

Radioactive Waste

Technical and Normative Aspects
of its Disposal

C. Streffer

C. F. Gethmann

G. Kamp

W. Kröger

E. Rehbinder

O. Renn

K.-J. Röhlrig

Christian Streffer · Carl Friedrich Gethmann · Georg Kamp ·
Wolfgang Kröger · Eckard Rehbinder · Ortwin Renn ·
Klaus-Jürgen Röhlig

Radioactive Waste

Technical and Normative Aspects
of its Disposal

 Springer

Series Editor

Professor Dr. Dr. h.c. Carl Friedrich Gethmann
Europäische Akademie GmbH
Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Germany

On Behalf of the Authors

Dr. Georg Kamp
Europäische Akademie GmbH
Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Germany

Desk Editor

Friederike Wütscher
Europäische Akademie GmbH
Wilhelmstraße 56, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Germany

ISBN: 978-3-642-22924-4

e-ISBN: 978-3-642-22925-1

Ethics of Science and Technology Assessment

ISSN: 1860-4803

e-ISSN: 1860-4811

Library of Congress Control Number: 2011935561

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, reuse of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilm or in any other way, and storage in data banks. Duplication of this publication or parts thereof is permitted only under the provisions of the German Copyright Law of September 9, 1965, in its current version, and permission for use must always be obtained from Springer. Violations are liable to prosecution under the German Copyright Law.

The use of general descriptive names, registered names, trademarks, etc. in this publication does not imply, even in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protective laws and regulations and therefore free for general use.

Cover design: eStudio Calamar S.L.

Typesetting: Scientific Publishing Services Pvt. Ltd., Chennai, India.

Printed on acid-free paper

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

Einleitung

Die Gefährdung von Mensch und Natur durch radioaktive Stoffe wird insbesondere durch die ionisierenden Strahlen hervorgerufen, die beim radioaktiven Zerfall dieser Stoffe freigesetzt werden. Es ist daher notwendig, radioaktive Abfälle, die in der Forschung, Medizin und Technik (vor allem hoch radioaktive Abfälle bei kerntechnischen Anlagen) anfallen, sicher zu verwahren. Die Dauer des gefährdenden Zustandes hängt entscheidend von den charakteristischen physikalischen Halbwertzeiten mit einer Spanne von Bruchteilen von Sekunden bis zu vielen Millionen Jahren ab, mit der die verschiedenen Radionuklide zerfallen. Brennelemente, die den Reaktoren der Kernkraftwerke entnommen werden, enthalten Radionuklide mit sehr langen Halbwertzeiten. Seit Kraftwerke dieser Art betrieben werden, ist es daher weltweit unumstritten, dass die radioaktiven Stoffe über sehr lange Zeiträume von der Biosphäre, dem Lebensraum der Menschen und aller weiteren Organismen, abgetrennt eingeschlossen werden müssen. Die Notwendigkeit, ein Endlager zu schaffen, wird wegen des Vorhandenseins der Abfälle auch in Deutschland gesehen.

Als Konzepte der Endlagerung sind insbesondere die oberflächennahe Endlagerung, die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen sowie die Versenkung in die Tiefsee und Einlagerung im Meeresboden diskutiert worden (SSK 1987). Weltweit wurden auch weitere Konzepte diskutiert (u. a. langfristige oder unbefristete Zwischenlagerung, Verbringung in den Weltraum, CoRWM 2006), mehrheitlich hat man sich jedoch für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen entschieden. Dies gilt auch für Deutschland. Für die Langzeitsicherheit dieser Endlager ist das Wirtsgestein für das Endlager von entscheidender Bedeutung, um zu verhindern, dass radioaktive Stoffe in mehr als unerheblichem Maße aus dem Endlager in die Biosphäre gelangen können. Als Wirtsgesteine stehen weltweit kristalline Formationen (z. B. Granit, Salzstöcke und Ton) zur Diskussion. In Deutschland ist bereits in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts die Endlagerung in Salzformationen vorgeschlagen worden.

Im Jahre 1977 beauftragte die Bundesregierung die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), ein Planfeststellungsverfahren für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben einzuleiten (Tiggemann 2004).

Ursprünglich sollte das Endlager Teil eines nuklearen Entsorgungszentrums mit einer Wiederaufarbeitungsanlage sein. Zur Klärung der damit verbundenen sicherheitstechnischen Fragen und Risiken des Entsorgungs-

zentrums und damit auch eines Endlagers fand vom 28. März bis 3. April 1979 in Hannover das „Symposion der Niedersächsischen Landesregierung zur grundsätzlichen sicherheitstechnischen Realisierbarkeit eines nuklearen Entsorgungszentrums“ („Gorleben-Hearing“) statt. Nach sehr sachlich geprägten Diskussionen unter dem Vorsitz des Physikers Carl Friedrich Freiherr von Weizsäcker ist der damalige Ministerpräsident des Landes Niedersachsen Ernst Albrecht, der Gastgeber und Teilnehmer des Symposiums gewesen ist, u. a. zu folgendem Resümee gekommen, das er im Niedersächsischen Landtag am 16. Mai 1979 gezogen hat: „Obwohl ein Nukleares Entsorgungszentrum [...] sicherheitstechnisch grundsätzlich realisierbar ist, empfiehlt die Niedersächsische Landesregierung der Bundesregierung, das Projekt der Wiederaufarbeitung nicht weiter zu verfolgen. Stattdessen sollte unverzüglich ein neues Entsorgungskonzept beschlossen werden, dessen Grundlinien wie folgt beschrieben werden können:

- (1) Sofortige Einrichtung inhärent sicherer Langzeitzwischenlager zur Entsorgung der Kernkraftwerke [...],
- (2) Vorantreiben der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur sicheren Endlagerung radioaktiven Abfalls,
- (3) Tiefbohrungen im Salzstock und bei positivem Ergebnis bergmännische Erschließung des Salzstockes in Gorleben, und falls die Bohrungen negativ ausfallen sollten, Erkundung anderer Endlagerstätten; denn Endlagerstätten brauchen wir.“

1979/1980 begann dann das Erkundungsprogramm in Gorleben – zunächst von über und von 1986 an von auch unter Tage. Das Programm wurde im Jahr 2000 durch ein maximal 10jähriges Moratorium unterbrochen. In dieser Zeit fanden immer wieder Castor-Transporte mit radioaktiven Abfällen nach Gorleben statt, die in einem dortigen Zwischenlager deponiert wurden. Die Erkundungen in Gorleben und die Transporte nuklearer Abfälle durch die Republik führten zu sehr emotionalen Debatten und vor allem umfangreichen, hitzigen, teilweise militanten Demonstrationen der Kritiker der Kernenergie im allgemeinen und des Endlagers in Gorleben insbesondere. Der Beschluss der Bundesregierung im Oktober 2010, die Erkundung des Salzstocks Gorleben wieder aufzunehmen, hat den Widerstand gegen das nukleare Endlager erneut entfacht und verstärkt. Es hat sich eine teilweise sehr aufgeheizte Atmosphäre herausgebildet, die kaum noch sachliche Dialoge zulässt.

Parallel dazu haben sich in diesem Zeitraum nationale und internationale wissenschaftliche Gremien mit Sicherheitsfragen von Endlagern für radioaktive Abfälle beschäftigt und entsprechende Kriterien festgelegt. So hat die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) im Juni 1985 eine Empfehlung über „Strahlenschutzaspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen“ verabschiedet. Die SSK ist von dem Prinzip ausgegangen, dass zukünftige Generationen in demselben Maße

vor ionisierenden Strahlen geschützt werden müssen wie die heutigen Menschen. Für die Nachbetriebsphase und damit die Langzeitsicherheit wurde empfohlen, dass die „potentielle Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung nach dem Eintritt unwahrscheinlicher Ereignisse den Betrag der mittleren Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition (effektive Äquivalentdosis) in der Bundesrepublik Deutschland nicht überschreiten“ sollte (SSK 1987). Dieses wird erreicht, wenn der Planungsrichtwert von 0,3 mSv pro Jahr eingehalten wird. Die Internationale Strahlenschutzkommission hat empfohlen, eine potentielle Strahlenexposition von 0,3 mSv pro Jahr (effektive Dosis) als Planungsrichtwert (dose constraint) für die Nachbetriebsphase anzusetzen (ICRP 1999).

Zur Betrachtung der Langzeitsicherheit sind zunächst Zeiträume von mehreren 10.000 Jahren in Betracht gezogen worden. Ein wesentliches Argument für eine solche Zeitperiode war, dass in diesem Zeitrahmen eine nächste Eiszeit in unserer Region erwartet werden kann. Auf der Basis prognostischer Aussagen der Geologen zu Zeitabläufen möglicher Veränderungen an den Endlagerstandorten und ggf. zur Migration von Stoffen durch die geologischen Barrieren wird die Abschätzung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle heute auf mehrere Hunderttausend bis zu einer Million Jahre ausgedehnt (SSK 2008; ICRP 2007; BMU 2010a). Für die potentielle Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase ist in neuerer Zeit ein Planungsrichtwert von 0,1 mSv pro Jahr vorgeschlagen worden (SSK 2008). Die vielfältigen Modellierungen zu Endlagern für hochradioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen mit verschiedenen Deckgebirgen und die Erfahrungen mit Endlagern für chemotoxische Stoffe in der Tiefe ergeben eine starke Evidenz für die Machbarkeit solcher Endlager, selbst bei den genannten strengen Kriterien.

Für chemotoxische Abfallstoffe werden schon heute in Deutschland und in anderen Ländern Endlager in tiefen geologischen Formationen betrieben. Sie finden weitgehend Akzeptanz, obwohl weniger aufwendige Sicherheitsnachweise geführt werden, diese Stoffe im Vergleich zu radioaktiven Abfällen häufig ein höheres gesundheitsgefährdendes Potential haben können und „ewige“ chemische Stabilität besitzen. Dennoch ist es bisher nicht gelungen, eine gesellschaftliche und politische Akzeptanz für ein konsensuelles Konzept der Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe zu erreichen. Dieses gilt besonders für Deutschland, aber auch weltweit für viele weitere Länder. Allerdings ist es in Finnland und in Schweden gelungen, Standorte für solche Endlager (Finnland: Olkiluoto, Schweden: Forsmark Gemeinde Östhammar) festzulegen. In Frankreich und in der Schweiz ist man offensichtlich auf einem guten Weg dahin, in den USA gab es allerdings einen erheblichen Rückschlag.

Die Gründe für die fehlende Akzeptanz von Endlagern für hochradioaktive Abfälle sind komplex. Sie liegen u. a. in der besonderen Wahrnehmung der Gefährlichkeit ionisierender Strahlen und damit von radioaktiven Stoffen in den Abfällen. Obwohl der Mensch ständig natürlicherweise

durch diese Strahlen exponiert wird und täglich natürlich vorkommende radioaktive Stoffe mit der Nahrung, dem Wasser und der Atemluft aufnimmt, obwohl nahezu alle Menschen in den industrialisierten Ländern in der Medizin aus diagnostischen oder auch therapeutischen Gründen ionisierenden Strahlen ausgesetzt sind und die möglichen Gesundheits-Risiken gut abgeschätzt werden können, haben viele Menschen große Vorbehalte, wenn sie ionisierenden Strahlen aus technischen Anlagen – selbst bei niedrigen Strahlendosen – ausgesetzt werden. Bei Kernkraftwerken kommt in diesem Zusammenhang ohne Zweifel den Folgen möglicher großer Unfälle eine wesentliche Bedeutung hinsichtlich der mangelnden Akzeptanz des Gefährdungspotentials zu. Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist eine solche Gefährdung durch Explosionen, Kernschmelzen oder andere plötzliche Unfälle nicht gegeben, jedoch wirkt sich die fehlende Akzeptanz der Kernkraft auch auf die der Endlagerung aus.

Ganz offensichtlich ist die Frage nach der angemessenen Entsorgung radioaktiver Abfälle mit einem hohen Konfliktpotential behaftet. Dabei sind bei diesem Thema die emotional besetzten Positionen und das Engagement, mit dem die Argumente vorgebracht werden, nur ein äußerer Indikator. Häufig stehen hinter der Auseinandersetzung um das nukleare Endlager tieferliegende gesellschaftliche Streitfragen um den Stellenwert technischer Entwicklungen für die künftige Ausgestaltung von Wirtschaft, Energieerzeugung und gesellschaftlichem Leben. Auch die Schärfe, mit der der Konflikt gelegentlich in der Öffentlichkeit ausgetragen wird, kennzeichnet zweifelsohne die Debatte und verdient ein genaueres Augenmerk, nicht zuletzt dann, wenn man nicht lediglich an der theoretischen Entwicklung von Lösungsstrategien, sondern an der praktischen Bewältigung des Konfliktes interessiert ist. Soll eine Entscheidung durch Beantwortung von Sachfragen herbeigeführt werden, wird der Konflikt auch hinsichtlich seiner sozial-gesellschaftlichen Dimension zu analysieren sein um zu prüfen, wie die zurzeit polarisierten Positionen in einen konstruktiven Diskurs über rationale, d. h. für alle Parteien nachvollziehbare und dann auch tolerierbare Strategien überführt werden kann. Nur so wird eine faktisch legitimierte Entscheidung für die Standortfrage und die Modalitäten eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle möglich sein.

Es ist eine Erfahrung der letzten Jahrzehnte, dass sich die Planung und der Umgang mit großtechnischen Anlagen nicht oder jedenfalls nicht allein durch die Lösung technischer Probleme erfolgreich durchführen lassen. Es ist wünschenswert, wenn nicht notwendig und in einem demokratischen System auch angemessen, die Akzeptanz oder zumindest die Toleranz bei den betroffenen Menschen zu erreichen. Dieses ist bereits beim Schlusswort zum „Gorleben-Hearing“ im Jahre 1979 von dem damaligen Ministerpräsidenten Albrecht zum Ausdruck gebracht worden. Er sagte: „[...] daß die Meinungsbildung in einem demokratischen Prozeß erfolgen muß, daß es sich hier nicht um technokratische Entscheidungen handelt, sondern letzt-

lich um demokratische Entscheidungen. Demokratie bedingt aber Argumentation, und Öffentlichkeit bedingt Transparenz.“ Dieses Plädoyer für Information, Partizipation, Kommunikation und Transparenz ist offenkundig in den folgenden Jahren nicht im notwendigen Maße befolgt worden. Ministerpräsident Albrecht hat aber bereits im Jahre 1979 auch gesagt, die endgültige Entscheidung „ist eine typisch politische Entscheidung. Die Verantwortung für diese Entscheidung kann niemand den politischen Instanzen abnehmen.“ Die Notwendigkeit dieser Handlungsfolgen wird in der vorliegenden Studie herausgearbeitet.

In dem Entscheidungsprozess über ein Endlager für hochradioaktive Abfälle kommt den Fragen der Unsicherheit der wissenschaftlichen Erkenntnisse und Modellierungen sowie einer möglichen Ambiguität der Beurteilung eines Zustandes sowie möglichen Widersprüchen der Aussagen von Experten eine erhebliche Bedeutung zu. Die Folge ist eine Verunsicherung der betroffenen Bevölkerung. In Deutschland wird dieses in erheblichem Maße durch die Vorgänge um das „Versuchs-Endlager“ Asse verstärkt. Es ist der breiten Bevölkerung kaum verständlich zu machen, dass die Asse als bloßes „Versuchs-Endlager“ auf einem ganz anderen Standard konzipiert worden ist, als es das geplante Endlager für hoch radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen werden wird. Es untergräbt auch die Glaubwürdigkeit, wenn festgestellt werden muss, dass bei der Asse ein fehlerhaftes Verhalten bzw. Vernachlässigung in der wissenschaftlich-technischen und behördlichen Betreuung dieses Endlagers stattgefunden hat.

Unvermeidbare Unsicherheiten der Erkenntnisse und der wissenschaftlichen Daten, ihre Darstellung und der Umgang mit ihnen sind ohne Zweifel außerordentlich schwierige Themen und erhebliche Hindernisse für das Bemühen, Akzeptanz für Endlager dieser Art zu gewinnen. Die sehr langen Zeitspannen der notwendigen Prognosen verstärken die Effekte offensichtlich noch in beträchtlichem Maße. Bereits in den kleinen und alltäglichen technischen Geräten sind nicht immer alle Parameter des Systems und alle externen Einflussgrößen bekannt. In noch so gut untersuchten singulären technischen Großinstallationen gilt dies aus prinzipiellen Gründen in verstärktem Maße. Die jüngsten Entwicklungen in Fukushima, Japan, zeigen auch, dass außerordentlich extreme Ereignisse eintreten können, die auch bei Zugrundelegung aller verfügbaren Daten nicht zu erwarten sind, gegen die aber, wegen der schwerwiegenden Folgen, Anstrengungen unternommen werden müssen, um entsprechende Vorsorge zu treffen.

Dies gilt offensichtlich insbesondere bei der Planung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle. Es müssen Aussagen zur Langzeitsicherheit über sehr lange Zeitperioden gemacht werden, die an die Grenzen des menschlichen Vorstellungsvermögens stoßen. Prognostische Aussagen gelingen dann nur über Modellrechnungen mit entsprechend großen Unsicherheiten. Es ist keine einfache Aufgabe, das Verständnis für derartige Zusammenhänge zu erreichen.

So laufen geologische Prozesse der Evolution in wesentlich längeren Zeiträumen ab als dies für biologische oder gar soziale Prozesse der Evolution der Fall ist. Diese Eigenheiten der möglichen geologischen Entwicklungen und ihre Veränderungen im Zeitablauf tragen dazu bei, dass prognostische Aussagen zur möglichen Überwindung der technischen und geologischen Barrieren über längere Zeiträume mit hinreichend höheren Genauigkeiten gemacht werden können im Unterschied zu Prognosen, wie die Region eines Endlagers über diese Zeitschiene besiedelt und wie die Lebensgewohnheiten dieser Menschen in diesen Zeiträumen sein werden. Auch noch so große prognostische Unsicherheiten rechtfertigten jedoch nicht, die möglichen Ansprüche von Angehörigen künftiger Generationen an die Entsorgung radioaktiver Abfälle auszublenden oder als irrelevant abzutun. Eine angemessene Entsorgungsstrategie muss vielmehr – gemäß dem ethischen Prinzip des Universalismus – den Angehörigen künftiger Generationen in gleichem Maße gerecht werden wie den Angehörigen der gegenwärtigen.

Mit dem vorangegangenen Hinweis auf die Überkomplexität der Konfliktlage soll weder der Problematik der Entsorgung radioaktiver Abfälle ein Sonderstatus zugesprochen noch Skepsis an einer möglichen Bewältigung dieses Konflikts angedeutet werden: Überkomplexe Kontroversen, in denen die Debatte um die angemessene oder taugliche Lösung eines Problems nicht nur Fragen nach der Angemessenheit und der Tauglichkeit der Lösungsstrategien aufwirft, sondern auch Fragen nach der Angemessenheit und Tauglichkeit der Standards zu ihrer Beurteilung, sind geübte Praxis in vielfältigen Bereichen des privaten und des öffentlichen Lebens. Sie geben Anlass zur politischen, juristischen und sozio-ökonomischen Institutionalisierung von Konfliktbewältigung. Hier sorgen Verfahrensregeln, neutrale Beurteilung oder Wettbewerb für effiziente Entscheidungen und die Erhaltung der Handlungsfähigkeit – denn angesichts der Offenheit von Kontroversen vorerst nichts zu tun, erweist sich oft als eine eher ungünstige Option. Die Analyse und Diskussion überkomplexer Kontroversen sind aber auch geübte Praxis in den Wissenschaften, die nachgerade als eine gesellschaftliche Hervorbringung zur Professionalisierung, d. h. zu der arbeitsteiligen Delegation der systematischen und ausdauernden, vom Druck effizienten Entscheidens befreiten Befassung mit Kontroversen dieses Typs gelten dürfen.

Es gibt also keinen Anlass, vor der Überkomplexität zu resignieren. Vielmehr sollten, solange noch kein Druck zu effizientem Entscheiden besteht, die konfliktveranlassenden Problemkonstellationen nach den Regeln wissenschaftlicher Rationalität erfasst, die Entscheidungsfragen differenziert, analysiert und präzisiert sowie die Optionen geordnet und geprüft werden.

In Vorbereitung auf eine Situation, in der ein effizientes Entscheiden notwendig wird, muss sorgfältig abgewogen werden, wie die Instrumente zur Konfliktbewältigung gewählt bzw. entwickelt werden müssen, damit sich eine dauerhafte Bewältigung des Konflikts herbeiführen lässt. Dauer-

haft kann dabei nur sein, was auf Dauer die Zustimmung oder mindestens Tolerierung breiter Teile der Beteiligten erhält. Dies setzt voraus, dass sich die Antworten auf Sachfragen, die in die Entscheidung einfließen, nicht bald als Irrtum erweisen, und dass die Beteiligten den Prozess, über den die Entscheidung zustande gekommen ist, nicht bald zu ihren Ungunsten als „unfair“ wahrnehmen und trotz ihrem früheren Einverständnis zum Prozess dem Prozessergebnis nachträglich die Legitimation absprechen. Hierbei ist an die eingangs gemachten Bemerkungen zur sozialen Dimension des Konfliktes und zur emotionalen Aufgeladenheit der Debatten zu erinnern, die zumindest in Teilen darauf zurückzuführen sein dürfte, dass hierauf in den ersten Schritten, da man die „Tiefe“ des Konflikts noch nicht absehen konnte, nicht hinreichend Aufmerksamkeit verwendet worden ist. In diesem Sinne versucht die vorliegende Studie Wege aufzuzeigen und vorzuschlagen, wie man aus dem Dilemma der jetzigen Situation zu einem akzeptablen Verfahren der Standortfindung und der Errichtung eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle finden kann.

Im Teil A der Studie sind die Texte sowohl in englischer als auch in deutscher Sprache zu finden. Zunächst werden in umfangreicheren Zusammenfassungen die wesentlichen Aussagen der Kapitel des Teiles B dargestellt und schließlich folgen Kapitel mit Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Es werden mögliche Wege zur Standortfindung aufgezeigt.

Im Teil B der Studie werden in getrennten Kapiteln zunächst die Strategien und technischen Konzepte der Entsorgung von hoch radioaktiven Abfällen und ihrer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen sowie die damit zusammenhängenden Fragen des Strahlenrisikos und des Strahlenschutzes dargestellt. Der Leser soll einen Überblick über den neuesten Kenntnisstand erhalten. Es folgen Kapitel zu ethischen, normativen Aspekten der Langzeitverantwortung, zu den rechtlichen Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle und zu Leitlinien für eine sozial verträgliche und gerechte Standortbestimmung. Um die Studie auch international einer wissenschaftlich geprägten Leserschaft zugänglich zu machen, sind diese Kapitel in englischer Sprache geschrieben.

Teil C bietet ergänzend strahlenbiologische Grundlagen und einen rechtsvergleichenden Überblick über die Regelungen wichtiger Kernenergie nutzender Staaten.

Eine wesentliche Schlussfolgerung der Studie ist, dass das bestmögliche Verfahren darin zu sehen ist, dass die Untersuchung von Gorleben als möglicher Standort fortgesetzt werden sollte, jedoch sollten parallel ein oder zwei weitere Standorte in Betracht gezogen und von Übertage an diesen Orten Untersuchungen durchgeführt werden. Dieses Verfahren dient vor allem dazu, bei einem möglichen Scheitern von Gorleben keine oder wenig Zeit für ein Umschalten auf einen anderen Standort zu verlieren. Es kann erwartet werden, dass ein solches Vorgehen die Akzeptanz der Standort-Suche und Findung erhöht. Zum anderen soll ein solches Verfahren auch die

Möglichkeit eröffnen, einen Alternativstandort einer vertieften, d. h. un-
tertägigen Untersuchung zu unterziehen, wenn aufgrund der dann vorlie-
genden Untersuchungen zu erwarten ist, dass der alternative Standort die
Auswahlkriterien deutlich besser erfüllt als Gorleben. Der Information,
Kommunikation, Partizipation und Transparenz wird bei dem Prozess der
Standortfindung ein hoher Stellenwert zugeschrieben. Es wird jedoch klar-
gestellt, dass die endgültigen Entscheidungen entsprechend den gesetzli-
chen Regelungen der Bundesrepublik Deutschland bei den hierfür zustän-
digen Institutionen liegen müssen.

A Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

1 Zusammenfassung

1.1 Technische Aspekte der dauerhaften Entsorgung radioaktiver Abfälle

Das Problem der Entsorgung radioaktiver Abfälle weist eine technische und eine gesellschaftliche Dimension auf. Lösungen müssen nicht nur technisch machbar, sondern auch gesetzlich und politisch durchsetzbar und gesellschaftlich akzeptabel sein und einen sicheren Einschluss langlebiger hochradioaktiver Abfälle für lange Zeiten gewährleisten sowie unangemessene Belastungen für zukünftige Generationen vermeiden.

Die Frage nach dem Fortbetrieb der Kernkraftwerke ist grundsätzlich von der Frage nach der angemessenen Entsorgung der radioaktiven Abfälle zu trennen, ganz gleich, welche Perspektiven einen Fortbetrieb der kerntechnischen Anlagen vorgesehen oder diskutiert werden. Die Abfälle und damit die Notwendigkeit, geeignete Entsorgungsstrategien zu entwickeln, sind unabhängig davon vorhanden. Die bei einer Entscheidung für eine Laufzeitverlängerung anfallenden zusätzlichen Mengen sind angesichts dessen nicht ausschlaggebend. Dass das Unterbreiten einer (technischen) Lösung für das Entsorgungsproblem eines der zentralen Argumente gegen die Kernkraft hinfällig machen würde, darf der Umsetzung einer solchen Lösung nicht im Wege stehen.

Bei der Nutzung spaltbaren Materials in Kernreaktoren zur Stromerzeugung entstehen verschiedene radioaktive Abfälle. Ob man die anfallenden radioaktiven Substanzen, insbesondere die bestrahlten Brennelemente, als Abfall oder als Ressource betrachtet, ist dabei häufig eine Frage der Strategie und der damit verbundenen Motivationen. Die diversen Arten von Abfällen unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich ihres Radionuklidgehalts, ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer physikalischen Beschaffenheit. Diese Eigenschaften bestimmen wesentlich die Schritte, die bei einer angemessenen Entsorgung der radioaktiven Abfälle unternommen werden müssen. Die Kategorisierung der Abfälle ist in verschiedenen Ländern durchaus unterschiedlich, dabei aber immer verbunden mit den vorgesehenen Entsorgungspfaden. Im Zentrum der vorliegenden Studie stehen die wärmeentwickelnden, hochradioaktiven Abfälle, für die es in Deutschland und auch weltweit noch keine etablierte Entsorgungslösung gibt.

Hinsichtlich des Umgangs mit verbrauchten radioaktiven Brennstoffen werden gegenwärtig mit dem „once-through cycle“ und dem „partially closed cycle“ zwei Hauptpfade unterschieden:

- Beim „once-through cycle“ werden die bestrahlten Brennelemente als Abfall angesehen. Eine Erhöhung der Abbrandrate würde dazu beitragen, die Anteile verbleibenden Spaltmaterials wie auch die Menge hochradioaktiven Hüllen- und Strukturmaterials pro Stromeinheit

zu reduzieren, während die Menge an langlebigen wärmeerzeugenden minoren Aktiniden leicht anstiege.

- Der „partially closed cycle“, der mit einer Wiederaufbereitung einhergeht, wurde von einigen Ländern eingeschlagen, besonders von solchen, die große und breit etablierte Nuklearprogramme haben. Von Deutschland wurde dieser Weg wieder aufgegeben. Die Castor-Transporte mit verglasten hochradioaktiven Abfällen nach Gorleben sind das Ergebnis älterer Wiederaufbereitungsverträge.

Ziel des „partially closed cycle“ ist die bessere Nutzung des Energiegehalts natürlicher Ressourcen (MOX-Brennstoffe). Die Vorteile dieses Verfahrens bestehen vor allem in der Reduktion der Volumina an verbrauchtem Brennstoff und in der langfristigen Verminderung der Radiotoxizität. Auch die Perspektive eines zukünftigen Kernenergieprogramms mit möglicherweise fortgeschrittenen Kernbrennstoffkreisläufen setzt einen solchen Kreislauf voraus. Nachteile sind vor allem die erhöhte Anzahl und die größeren Volumina der Transporte radioaktiver Materialien, die potenziell gefährlich sind, daher strengen internationalen Richtlinien unterliegen und die Gegenstand öffentlicher Konflikte sind. Nachteile werden ferner in der Abtrennung von Spaltmaterial und radiotoxischen Materialien (besonders Plutonium) und deren Lagerung vor Ort gesehen.

Mit der Einführung der sogenannten „advanced fuel cycles“ werden geschlossene Brennstoffkreisläufe mit fortgeschrittener Wiederaufbereitungstechnologie und verschiedene Arten von hochentwickelten Reaktoren mit einem thermischen oder schnellen Neutronenspektrum angestrebt. Es wurden zahlreiche nationale und internationale Anstrengungen unternommen, um modernere „Reaktorensysteme“ zu entwickeln und zu gestalten, die ungefähr zwischen 2030 und 2040 kommerziell genutzt werden könnten.

Partitionierung und Transmutation der langlebigen minoren Aktiniden (P&T) könnte die langfristig radiotoxischen Lagerbestände erheblich, in der Größenordnung des 100-fachen, reduzieren. Der Energie-Gehalt und die Wärmeleistung der Abfälle ließen sich ebenfalls dramatisch verkleinern, sodass die Reduzierung der Lagergröße oder, im Falle größerer Programme, der Anzahl der Lagerstätten möglich wird. Hinsichtlich möglicher radiologischer Belastungen in der Biosphäre aufgrund einer eventuellen langfristigen Migration von Radionukliden durch das Wirtsgestein ist jedoch keine signifikante Verbesserung zu erwarten.

Die Unterkritikalität der bestrahlten Brennstoffe und Abfälle aller Art ist für die gesamte Entsorgungskette sicherzustellen, insbesondere auch für das Endlager. Die Beurteilungen, die im Rahmen bisheriger Entsorgungsprogramme vorgenommen wurden, zeigen, dass, sofern der tatsächliche Abbrand und gegebene Unsicherheiten beachtet werden, Unterkritikalität für „once-through cycles“ gewährleistet werden kann. Für nicht-offene Zyklen ist dieser Aspekt irrelevant.

Wie auch andere Arten von Abfall verlangt radioaktiver Abfall nach einer umfassenden Strategie mit dem Ziel, die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu bewahren und Sicherheit zu gewährleisten. Die Strategie sollte die Entladung, die Behandlung, den Transport, die Lagerung und die Entsorgung als wesentliche Schritte enthalten. Die genaue Abfolge dieser Schritte unterscheidet sich von Land zu Land in Bezug auf verschiedene Abfalltypen und grundsätzliche Entscheidungen hinsichtlich des gesamten Brennstoffkreislaufes.

Die *Lagerung* geschieht (nach der Definition der IAEA) „mit der Absicht der Rückholung“ und kann verschiedenen Funktionen dienen (z. B. der Verringerung des Anteils kurzlebiger Radionuklide oder der Transportlogistik, aber auch dem Abwarten, bis eine Entsorgungslösung verfügbar ist). Es sind verschiedene technische Lösungen etabliert: Über oder direkt unter der Erdoberfläche, nass oder trocken, Fremdkühlung oder Naturkonvektion. Lagerzeiträume bewegen sich im Bereich von Jahrzehnten bis hin zu einem Jahrhundert; die Lagerung über mehrere Jahrhunderte wird gelegentlich diskutiert und erwogen.

Entsorgung geschieht (nach der Definition der IAEA) „ohne Absicht der Rückholung“. Das Material wird definitiv als Abfall und nicht als Ressource betrachtet.

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von Entsorgungsoptionen, einschließlich sog. „exotischer“ Lösungen, diskutiert. Verblieben sind danach Optionen, die sämtlich auf der grundsätzlichen Entscheidung für „Concentrate & Confine“ („Konzentrieren und Einschließen“) anstelle von „Dilute & Disperse“ („Verdünnen und Verteilen“) beruhen:

- Optionen, die technisch vergleichbar sind mit (Zwischen-)Lagerungslösungen und daher während der gesamten Lagerzeit begleitende Maßnahmen erfordern, zum Beispiel in Form von Monitoring, Kontrollen, Wartung, Erneuerungsmaßnahmen etc.;
- Optionen, die einen Zustand herstellen, bei dem keine weiteren menschlichen Eingriffe oder Folgeaktivitäten benötigt werden („passive Sicherheit“); tiefe („geologische“) Endlagerung in bergwerksähnlichen Anlagen, gelegentlich auch in tiefen Bohrlöchern, wird dabei favorisiert.

Misstrauen hinsichtlich der Idee der passiven Sicherheit war einer der Beweggründe für die Betrachtung langfristiger (Zwischen-)Lagerlösungen oder auch von Ansätzen, bei denen eine Rückholung der Abfälle, wenn auch nicht beabsichtigt, so doch durch die Auslegungsmaßnahmen erleichtert wird – wenn auch nur für einen begrenzten Zeitraum nach der Einlagerung („rückholbare Endlagerung“).

Internationale Lösungen (gelegentlich auch als „regional“ bezeichnet) eignen sich in besonderem Maße für Länder mit geringeren Abfallmengen und/oder geografischen und geologischen Randbedingungen, die eine Implementierung nationaler Lösungen schwierig machen.

Um exemplarisch zu verdeutlichen, wie die obengenannten Elemente zu einer Strategie für den Umgang mit radioaktiven Abfällen zusammengefügt werden, soll eine eher einfache, auf dem offenen „once-through“-Brennstoffzyklus beruhende Strategie als Referenz detaillierter beschrieben werden. Abgebrannter Kernbrennstoff wird zu Abfall erklärt, es findet keine Wiederaufbereitung statt, und der Abfall wird in einem tiefgelegenen (geologischen) Endlager deponiert. Die Beschreibung des Prozesses bezieht keine anderen Abfälle mit ein:

- Entnahme und mehrjährige Abklinglagerung im Kühlbecken auf dem Reaktor-Gelände;
- Einsetzen in Transportbehälter, Kurzstreckentransport zu einer nahe gelegenen (Zwischen-)Lagerstätte oder Langstreckentransport zu einer zentralen (Zwischen-)Lagerstätte;
- Zwischen-, Puffer- und Abklinglagerung (lokal oder zentral) über mehrere Jahrzehnte – je nach Entsorgungsprogramm;
- Transport zu einer Konditionieranlage (kurze oder lange Strecke je nach Ort der Lagerung), Pufferlagerung und Konditionierung für die Endlagerung;
- Pufferlagerung, Transport zum Endlager – kurze oder lange Strecke je nach Zielort;
- Einlagerung im Endlager.

Strategien, die auf teilweise oder gänzlich geschlossenen (fortgeschrittenen) Brennstoffkreisläufen beruhen, erfordern eine Wiederaufbereitung abgebrannter Brennstoffe und die Herstellung gemischter Brennstoffe. Sie weichen daher hinsichtlich der Logistik des Material- bzw. Abfallmanagements vor der Entsorgung und hinsichtlich des Aufkommens, der Form, des radioaktiven Gehalts, der Wärmeentwicklung und anderer Eigenschaften des Materials voneinander ab.

Hinsichtlich der strategischen Entscheidung über den „Endpunkt“ der Entsorgung radioaktiver Abfälle sind die wesentlichen Unterschiede zwischen einer „verlängerten (Zwischen-)Lagerung“ und der Entsorgung in tiefeingeologischen Schichten in dem jeweiligen Ausmaß zu sehen,

- in dem Sicherheit und Gefahrenabwehr langfristig abhängig sind von aktiven Maßnahmen (was mit Strahlenbelastungen für diejenigen, die die Maßnahmen umsetzen, einhergeht), und
- in dem die Verbringungsmaßnahmen zu unterschiedlichen künftigen Zeitpunkten reversibel (insbesondere die Abfälle rückholbar) sind.

Welcher der Optionen man dabei den Vorzug gibt, hängt letztlich auch davon ab, wie sehr man auf die Verlässlichkeit der jeweiligen Schutz- und Sicherheitsvorkehrungen vertraut und wie man sich gegenüber der Verpflichtung gegenüber künftigen Generationen stellt.

Hybrid-Lösungen wie z. B. eine rückholbare Entsorgung und/oder eine verzögerte Schließung der Endlagerstätten gehen mit Zielkonflikten einher. Ansätze hierzu werden in verschiedenen Ländern verfolgt, ein verzögerter Verschluss etwa im Vereinigten Königreich und ein stufenweiser Verschluss in Abhängigkeit von den abnehmenden Möglichkeiten bzw. dem steigenden Aufwand zur Erhaltung der Rückholbarkeit in Frankreich. Eine verlängerte Zwischenlagerung (potentiell länger als ein Jahrhundert) wird in den Niederlanden umgesetzt.

Die Vielfalt macht die inhärente Ambiguität in der Entscheidung über einen „Endpunkt“ deutlich. Insbesondere wird deutlich,

- dass die Einrichtung einer Rückholbarkeit ein komplexes Unterfangen ist,
- dass es keine einfache Antwort gibt auf die Frage, ob entsorgte Abfälle rückholbar sein sollen oder nicht – eher ist von verschiedenen „Graden der Rückholbarkeit“ auszugehen,
- dass der Grad der Rückholbarkeit wesentlich vom in Frage stehenden Zeitrahmen abhängt. Der ist aber (mit einigen Jahrzehnten bis zu maximal drei Jahrhunderten) in jedem Fall erheblich kürzer als derjenige, für den Sicherheit nach dem vollständigen Verschluss gewährleistet werden muss (in der Größenordnung von einigen hundert tausenden von Jahren).

Der Wunsch nach Rückholbarkeit des eingelagerten Materials einerseits und nach einer langfristig sicheren Verwahrung sowie einem langfristigen Schutz der spaltbaren Materialien vor Zugriff und Weiterverbreitung andererseits kann zu Zielkonflikten führen. Insbesondere besteht ein Gegensatz zwischen rückholbarer Einlagerung und Zugriffsschutz. Das letztendliche Ziel jeder Entsorgung und insbesondere derjenigen in tiefengeologischen Schichten besteht darin, Gefahrenabwehr und Risikovorsorge auf sehr lange Fristen zu gewährleisten und ggf. dort, wo die daraus sich ergebenden Anforderungen einander widersprechen, diese möglichst auszugleichen. Maßnahmen zur eventuellen Gewährleistung einer Rückholbarkeit sind im Falle eines Zielkonflikts demgegenüber nachrangig. Alle gegenwärtig diskutierten Konzepte streben eine Gefahrenabwehr und Risikovorsorge auf sehr lange Fristen als Hauptziele an – gleichwohl besteht eine *erhebliche Variationsbreite* aufgrund der unterschiedlichen verfügbaren Wirtsgesteine und weiterer Aspekte. Obwohl die Grundpfeiler, die die Sicherheit und Gefahrenabwehr gewährleisten sollen (z. B. Einschluss, Isolation, Migrationsbegrenzung, Beschränkung der Folgen) jeweils dieselben sind, weichen doch die Gewichtung dieser Faktoren (in Abhängigkeit von der zeitlichen Entwicklung nach dem Verschluss) und Mittel, sie im Gesamtkonzept zu gewährleisten, erheblich voneinander ab.

Grundsätzlich gilt für keines der in Frage kommenden Wirtsgesteine, dass es ausschließlich günstige Eigenschaften hinsichtlich der Vielzahl al-

ler dieser Aspekte besitzt. Um die jeweils positiven Eigenschaften zu nutzen und die unerwünschte Einwirkung der weniger günstigen zu kompensieren, ist immer eine entsprechende – auch dem jeweiligen Zeitrahmen angemessene – Anpassung der Auslegung der Endlager und der (geo-)technischen Maßnahmen erforderlich.

Es muss mittels Langzeituntersuchungen, die das erwartbare Spektrum unerwünschter Ereignisse, Zustände und Entwicklungen vollständig in Betracht ziehen, *belegt* werden, dass die Ziele der Entsorgungsbemühungen erreicht wurden. Der Nachweis angemessener Gefahrenabwehr kann dabei anhand des Falles des (unbeabsichtigten) Eindringens in das Lager erbracht werden: Als Folge der Entscheidungen für eine konzentrierte und isolierte Lagerung der radioaktiven Abfälle muss die Möglichkeit akzeptiert werden, dass es bei einem Eindringen in die Lagerstätten zu Überschreitungen der für Strahlenexpositionen gesetzten Richt- bzw. Grenzwerte kommen kann. Die Folgen eines solchen Eindringens lassen sich dabei nicht angemessen quantifizieren, da sich die künftigen Rahmenbedingungen und andere relevante Parameter nur mit großer Unsicherheit vorhersagen lassen, auch dann nicht, wenn man die Radiotoxizität der Lagerinventare als ein Maß für ihr Gefahrenpotential heranzieht.

Die Beurteilung der langfristigen radiologischen Sicherheit, der eine herausgehobene Rolle zugeschrieben wird, erfolgt traditionell auf der Basis von Expositionsrechnungen für Freisetzungsszenarien. Da die Entwicklung einiger Systemkomponenten, insbesondere die der oberflächennahen, aber kaum zu prognostizieren ist, bestehen jedoch hohe aleatorische und epistemische Ungewissheiten. Abgeschätzte Strahlenexpositionen taugen daher kaum als Maß erwartbarer gesundheitlicher Beeinträchtigungen, sondern vielmehr als Indikatoren für das Funktionieren des Endlagers, das entscheidend von tiefer gelegenen besser prognostizierbaren Komponenten abhängt.

Das Konzept des „Safety Case“ entsteht durch die Verknüpfung von sicherheitsbezogenen Elementen und Argumenten aus der Standorterkundung, Forschung, Endlagerentwicklung und -konstruktion, Sicherheitsanalyse etc. Der Safety Case entwickelt sich mit der Zeit gemeinsam mit dem Endlagerprojekt und -konzept. Der Umgang mit Unsicherheiten ist ein zentrales Element.

Die Entwicklung eines Endlagerprogramms, die damit verbundene Standorterkundung und Forschung und Entwicklung, das Endlagerkonzept und der Safety Case können als Optimierungsprozess über die Dauer mehrerer Jahrzehnte gesehen werden. Die Zielfunktion besteht aus kurz- und langfristigen Sicherheitsaspekten, Realisierbarkeit, Kosten, gesellschaftlicher Akzeptanz und rechtlicher Machbarkeit und evtl. anderen Parametern. Es muss beachtet werden, dass die Zielfunktion sich mit der Zeit verändern kann (z. B. hat sich der Zeitrahmen für die Demonstration der langfristigen Sicherheit über die vergangenen zwei Jahrzehnte um zwei Größenordnungen erhöht).

Daher ist es nicht sinnvoll, vergangene Entscheidungen nochmals aufzunehmen („retrospektive Optimierung“) um danach zu fragen, ob diese Entscheidungen aufgrund heute geltender Standards erzielt wurden. Vielmehr ist die Frage essentiell, ob die Ergebnisse früherer Entscheidungen (ein Standort, eine Endlagerauslegung etc.) nach heutigen Standards noch vertretbar sind!

Der Endlagerbetrieb könnte frühestens ca. 2035 beginnen unter der Voraussetzung, dass jeder Schritt im Programm vollständig erfolgreich wäre (d. h. Entscheidung für Gorleben 2017, sofortige Planfeststellung etc.). Mögliche Verzögerungen z. B. durch die Ablehnung von Gorleben, die Suche nach einem anderen Standort (unmittelbar oder nach einer Ablehnung von Gorleben etc.) würden in Größenordnungen von mehreren Jahrzehnten liegen.

Die technische Implementierung neuer Technologien (z. B. Abtrennung und Transmutation) kann evtl. für die 2030er und 2040er erwartet werden. Solange abgebrannte Kernbrennstoffe nicht endgelagert werden (d. h. mindestens bis 2035) wird es keine Einschränkung der Flexibilität selbst bei Unterstellung eines „schnellen“ Endlagerprogramms geben.

Dies gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass ein Plan mit klar definierten Entscheidungspunkten besteht. Andernfalls wird das Hin und Her der Vergangenheit und Gegenwart, mit seiner starken Abhängigkeit von der politischen Ausrichtung der jeweiligen Regierung, die mit jeder Wahl wechseln könnte, weitergehen, und der Prozess könnte endlos weiter gehen, ohne zu einer Lösung zu führen.

1.2 Strahlenrisiko und Strahlenschutz

Für die Evaluation radio-toxikologischer Effekte ist die Kenntnis der Dosiswirkungsbeziehung notwendig. Im Strahlenschutz werden zwei grundsätzlich verschiedene Klassen dieser Beziehungen verwendet. Der prinzipielle Unterschied besteht darin, ob eine Dosis-Wirkungs-Kurve mit oder ohne Schwellendosis vorliegt. Die erste Möglichkeit trifft für *deterministische* Effekte (akute Effekte, fibrotische und ähnliche Gewebe-Effekte, sowie entwicklungsbiologische Effekte) zu. Die Schwellendosen für diese Effekte liegen in einem Bereich von mehr als 100 mSv. Keine Schwellendosis wird dagegen für die Verursachung von *stochastischen* Effekten (genetischen Effekten und Krebs) angenommen, so dass unter dieser Annahme auch bei sehr kleinen Strahlendosen Effekte auftreten können. Es wird für diese Effekte eine lineare Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellendosis (LNT-Modell) vorgesehen.

Die fundamentale Größe im Strahlenschutz ist die absorbierte Dosis (D) in Gray (Gy), sie gibt die absorbierte Energie in einem Massenelement (m) an. Da verschiedene Strahlenqualitäten (Strahlenart und Strahlenenergie) bei gleicher absorbierter Dosis zu unterschiedlichen Effekten führen, wird eine Gewichtung der absorbierten Dosis vorgenommen und man erhält

dann die Äquivalentdosis bzw. Organdosis (H) in Sievert (Sv). Das für niedrige Strahlendosen bedeutsame Krebsrisiko ist in den verschiedenen Organen bei gleicher Organdosis unterschiedlich. Daher werden die Organdosen mit entsprechenden Gewebe-Wichtungsfaktoren multipliziert. Die Summe dieser Produkte ergibt die effektive Dosis (E) in Sv, die mit dem stochastischen Strahlenrisiko in Beziehung steht. Die effektive Dosis ist ein brauchbares Instrument, um regulatorische Prozesse z. B. der Optimierung abzuwägen. Es können durch sie alle Expositionspfade beim Menschen erfasst und in einem Gesamtwert angegeben werden.

Die Dosisgrenz- und Richt-Werte werden als effektive Dosen angegeben. Die Grenzwerte betragen während der Betriebsphase des Endlagers (Einlagerung der radioaktiven Stoffe) für Beschäftigte am Arbeitsplatz 20 mSv pro Jahr und für Personen der Bevölkerung in der unmittelbaren Umgebung kerntechnischer Anlagen während der Betriebsphase 1 mSv pro Jahr. Bei Endlagern für hochradioaktive Abfälle wird ein „Dosis-Constraint“ (Richtwert) von 0,1 bis 0,3 mSv pro Jahr in der Nachbetriebsphase (Tausende bis Millionen Jahre) nach Verschluss des Lagers von verschiedenen internationalen Gremien vorgesehen. Das BMU hat neuerdings für diese Dosis 10 μ Sv pro Jahr vorgeschlagen. Eine solche Dosis bezeichnet die ICRP als „triviale“ Dosis, der keine Bedeutung zukommt.

Zur Optimierung von Strahlenquellen im Strahlenschutz wird häufig die effektive Kollektivdosis herangezogen. Es wird der Mittelwert der effektiven Individualdosen mit der Zahl der exponierten Personen multipliziert und die Dosis dann in „man Sv“ angegeben. Zur besseren Abschätzung der Situation sollten die Bereiche der Personendosen, die zeitliche Periode, in welcher die betreffenden Dosen berücksichtigt werden, und andere Faktoren bei der Ermittlung der Kollektivdosen benannt werden. Für die Abschätzung von Strahlenrisiken insbesondere im niedrigen Dosisbereich sind die Kollektivdosen nicht geeignet.

Die Radiotoxizität der Radionuklide wird bestimmt durch die Strahlung, die beim radioaktiven Zerfall auftritt. Hinsichtlich des Langzeitrisikos sind Radionuklide mit einer langen physikalischen Halbwertszeit von entscheidender Bedeutung, da diese Radionuklide in einigen Fällen über mehr als eine Million Jahre in beträchtlicher Menge weiter bestehen und über lange Zeiträume radioaktiv zerfallen. Nach Aufnahme dieser Stoffe in den menschlichen Körper kann vor allem dann eine Strahlenexposition über längere Zeitperioden auftreten, wenn neben einer langen physikalischen Halbwertszeit auch eine lange biologische Halbwertszeit besteht. Es muss dann die „Folgedosis“ über einen längeren Zeitraum (bei Erwachsenen 50 und bei Kindern bis zum Alter von 70 Jahren) abgeschätzt werden. Die Strahlendosis wird in diesen Fällen mit Hilfe des Folgedosiskoeffizienten (committed effective dose coefficient, CED, angegeben in Sv/Bq) ermittelt. Dieser Koeffizient ist ein gutes Maß für die Radiotoxizität eines Radionuklids (International Commission for Radiological Protection ICRP).

Zwei Faktoren sind für die Exposition des Menschen und der Umwelt durch Endlager von entscheidender Bedeutung:

- (1) Die Dauer der physikalischen Halbwertszeit des betreffenden Radionuklids
- (2) Die Mobilität des radioaktiven Materials nach Freisetzung aus dem Behälter im Endlager und die folgende Migration durch die technische sowie anschließend durch die geologische Barriere in die Biosphäre.

Modellrechnungen mit Granit, Salz und Ton als Wirtsgestein und Deckgebirge haben ergeben, dass im Allgemeinen wegen ihrer geringen Mobilität nicht die schwer löslichen Oxide der α -strahlenden Transurane entscheidend zur Exposition des Menschen in der späten Phase eines Endlagers beitragen. Es sind vielmehr die besonders mobilen, häufig als Ionen vorliegenden Radionuklide wie Jod-129, Chlor-36, Kohlenstoff-14, Selen-79 und Cäsium-135. In den vorliegenden Modellrechnungen werden im Allgemeinen die höchsten Strahlenexpositionen durch Jod-129 in dem Zeitraum von etwa 20.000 bis etwa 100.000 Jahren ermittelt. Die Strahlendosen werden wiederum als effektive Dosen angegeben. Das bedeutet für Jod-129, dass aus Gründen der Biokinetik und des Stoffwechsels durch dieses Radionuklid nahezu ausschließlich die Schilddrüse exponiert wird. So liegt die Strahlendosis bei radioaktivem Jod in der Schilddrüse um etwa den Faktor 1.000 höher als in den anderen Organen und Geweben. Die effektive Dosis liegt etwa um den Faktor 20 niedriger als die Dosis in der Schilddrüse. Die Verursachung von Krebs in der Schilddrüse durch radioaktives Jod ist vor allem nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl und bei nuklearmedizinischen Studien gut untersucht. Die Freisetzung und Migration der mobilen Radionuklide aus dem Endlager in die Biosphäre und ihre Modifizierung bedarf weiterer intensiver Untersuchungen.

Mikrodosimetrische Überlegungen führen dazu, dass bei Strahlendosen unterhalb von 1 mSv sehr heterogene Dosisverteilungen auftreten. Mit weiter abnehmender Dosis werden immer weniger Zellen eines Gewebes exponiert. Bei einer Dosis von 1 μ Sv wird unter 1.000 Zellen weniger als 1 Zelle noch exponiert, während die Dosis pro exponierter Zelle gleich bleibt. Welche Bedeutung dieses für die Verursachung von Gesundheitseffekten hat, ist bisher nicht geklärt.

Bei Endlagern hochradioaktiver Stoffe sind in der Spätphase nach Abschluss des Lagers keine Strahlenexpositionen in Höhe der Schwellendosen für deterministische Effekte zu erwarten. Daher können diese Effekte nicht auftreten. Es können nur stochastische Effekte (insbesondere die Verursachung von Krebs) durch Extrapolationen rechnerisch abgeschätzt werden. Epidemiologische Untersuchungen haben ergeben, dass für eine allgemeine Bevölkerung eine signifikante Erhöhung der Krebserkrankungen nach einer Strahlendosis von etwa 100 mSv beobachtet werden kann. Da es im individuellen Falle einer Krebserkrankung keine

spezifischen Merkmale gibt um zu erkennen, ob der individuelle Krebs durch ionisierende Strahlen verursacht worden ist oder nicht, ist nur die Angabe von Verursachungs-Wahrscheinlichkeiten für die Erkrankung möglich.

Diese Untersuchungen haben zur Bestimmung von Risikofaktoren geführt. Es ergibt sich ein Wert von 5×10^{-2} pro Sv. Das bedeutet, dass bei einer Dosis von 1 mSv das Krebsrisiko 5×10^{-5} und bei 0,1 mSv 5×10^{-6} beträgt. Dieses Risiko sollte man mit dem allgemeinen Lebenszeit-Risiko von etwa 0,4 vergleichen, mit dem die Menschen in Deutschland an Krebs erkranken. Die potentiellen Krebsrisiken, die sich durch ein Endlager ergeben können, liegen weit unterhalb eines „Messbereiches“, in dem mögliche, zusätzliche Krebserkrankungen erkannt werden können.

Alle Lebewesen werden seit jeher durch ionisierende Strahlen aus natürlichen Quellen exponiert. In Deutschland beträgt diese Exposition für jeden Bürger im Mittel etwa 2,3 mSv pro Jahr (effektive Dosis). Etwa 50 % dieser Dosis wird durch die Inhalation von Radon mit seinen radioaktiven Folgeprodukten hervorgerufen. Die anderen Komponenten der Expositionen sind externe kosmische Strahlung durch die Sonne, externe terrestrische Strahlung durch radioaktive Stoffe im Boden und interne Strahlenexpositionen durch die Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung und dem Trinkwasser. Jeder Mensch in Deutschland trägt in seinen Geweben mit sich im Mittel etwa 9.000 Bq an natürlichen radioaktiven Stoffen (vorwiegend Kalium-40 und Kohlenstoff-14). Die Strahlenexpositionen aus natürlichen Quellen sind regional sehr unterschiedlich. Die externen Expositionen können in Deutschland um den Faktor 5 bis 8 und beim Radon noch größer über dem Durchschnittswert liegen.

Neben den Expositionen aus natürlichen Quellen erhalten die Menschen vor allem in den Industrieländern Strahlenexpositionen aus weiteren zivilisatorischen Situationen. Den größten Anteil hierzu liefert die Medizin, vor allem die Röntgendiagnostik. Der Durchschnittswert pro Kopf der Bevölkerung in Deutschland liegt jetzt etwa im Bereich der mittleren Exposition aus natürlichen Quellen mit weiter steigender Tendenz.

Es gibt keinen wissenschaftlichen Zweifel, dass die Strahlenexpositionen aus natürlichen Quellen dieselben biologischen bzw. gesundheitlichen Effekte verursachen können wie die zivilisatorischen Expositionen. Ein Vergleich der Strahlendosen aus den verschiedenen Quellen mit den daraus folgenden Wirkungen ist daher in vollem Maße gerechtfertigt.

Die Unsicherheiten der Dosis- und Risiko-Abschätzungen sind in dem niedrigen Dosisbereich von 1 mSv und unterhalb dieser Strahlendosis sehr groß. Da die möglichen Strahlendosen bei Endlagern vor allem durch Inkorporation radioaktiver Stoffe hervorgerufen werden, nehmen die Unsicherheiten weiterhin zu, da die Dosis-Abschätzung nur über Modellrechnungen erfolgen kann. Andererseits gibt es für die radioökologischen Expositionspfade von Jod und Caesium relativ gute Daten aus den Erfah-

rungen nach der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl und dem Fallout der Atombombentests.

Die Dosis- und Risiko-Abschätzungen werden mit Hilfe von Referenz-Modellen und -Personen durchgeführt. Daher wird die individuelle Variabilität innerhalb der menschlichen Population nicht berücksichtigt. Andererseits kann davon ausgegangen werden, dass der Stoffwechsel und damit auch die Biokinetik radioaktiver Stoffe im menschlichen Organismus selbst nach Tausenden bis Millionen Jahren sich nicht so dramatisch ändern werden, wie das für den Lebensstil und allgemeine menschliche Verhaltensregeln der Fall sein wird. Ebenso ist es wohl kaum möglich, Aussagen über die Größe menschlicher Populationen und weitere Bedingungen menschlichen Lebens am Ort des Endlagers über einen langen Zeitraum zu machen, der die Perioden mit soliden Kenntnissen zur Kultur der zurückliegenden Menschheitsgeschichte übersteigt.

1.3 Entsorgung hochradioaktiver Abfälle unter dem Aspekt der Langzeitverantwortung

Dem Appell an „die Ethik“ in Streitlagen und dem Hinweis auf die Notwendigkeit, sich in einer Entscheidungslage von gesellschaftlichem Belang an „ethischen Maßstäben“ orientieren zu müssen, liegt häufig ein unangemessenes Verständnis der angesprochenen Disziplin zugrunde. Ethik kann keine höheren Prinzipien, keine zeitlos gültigen Imperative oder Werte formulieren, aus denen sich für die in Frage stehende Situation top-down angemessene Handlungsanweisungen deduzieren ließen. Die Domäne der Ethik ist vielmehr die Entwicklung aussichtsreicher Strategien zur Konfliktbewältigung. Konflikterzeugend ist nicht selten gerade die Orientierung an den Regeln, die das Handeln innerhalb einer Kultur bestimmen und dem Einzelnen als Legitimationsgrund für sein Handeln dienen („Moralen“), die in verschiedenen Kulturen sowie deren Binnen- und Subkulturen aber auf unterschiedliche Weise etabliert sind. Die kritische Analyse von Moralens und ihrer Reichweite ist daher ein prominenter Gegenstand der Ethik.

Im Konflikt um die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist – nebst den divergierenden Meinungen über die Wirkungen und Nebenwirkungen der einzusetzenden Mittel – auch mit divergierenden Zwecksetzungen sowie mit divergierenden moralischen Vorstellungen, letztlich mit unterschiedlichen Verständnissen dessen, was legitimationsbedürftig ist und was als Legitimationsgrund taugen kann, zu rechnen. Eine rationale Bewältigung dieses Konflikts setzt damit nicht nur eine Verständigung über die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge voraus, sondern auch eine kritische Reflexion der Zweck-Konstellationen und der vorgebrachten Legitimationsgründe für die Mittelwahl („Entsorgungsstrategien“).

Es wäre ein Kategorienfehler, in generationenübergreifenden Problemstellungen vom Typ der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ungeprüft

Maßstäbe vorauszusetzen, die den etablierten lebensweltlichen Moralpraxen entnommen sind – jedenfalls solange die Handlungserfordernisse noch (zeitliche) Ressourcen freilassen, um unter neutraler Beleuchtung möglichst vieler Aspekte möglichst rationale Vorschläge zu entwickeln und ggf. Handlungs- und Entscheidungsbedingungen so zu verändern, dass eine optimierte Konfliktbewältigung möglich wird.

Drei solche Kategorienfehler durchziehen die Debatte um die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle:

- (1) Die Forderung nach einer unverzüglichen Problemlösung geht mit erheblichen Rechtfertigungslasten einher, die nur eingelöst werden können, wenn man die situativen Handlungsbedingungen nach dem Muster einer Notfallsituation deutet. Notfallsituationen rechtfertigen oft Zumutungen gegenüber Dritten, die sonst in längerfristiger Planung nicht hinzunehmen wären.
- (2) Angesichts der handlungsdruck-enthobenen Entscheidungslage für Fragen der gerechten Verteilung von Lasten (Kosten, Risiken) sind nicht lediglich die etablierten Prinzipien der Gerechtigkeit auf eine feste Verteilungssituation mit einer festen „Verteilmasse“ anzuwenden. Vielmehr gilt es einen Plan zu entwerfen, der – unter der Maßgabe der begründeten Ausnahme von der Gleichheit – die gezielte Optimierung der Verteilungssituation und der „Verteilmasse“ herbeizuführen geeignet ist. Die unter Appell an moralische Prinzipien vorgetragenen Anspruchskonflikte lassen sich so in Erwägungen (oder auch: Verhandlungen) über konfliktbefriedigende Allokationen aller möglichen in Frage stehenden Lasten und Güter überführen.
- (3) Angesichts der vielen künftigen von den Risiken Betroffenen kann es – entgegen der im Verursacherprinzip ausgedrückten moralischen Intuition – gerade ein Gebot der Fairness sein, nicht dem Verursacher der Abfälle auch deren Entsorgung aufzutragen. Sind Andere aufgrund höherer Kompetenz oder günstigerer Voraussetzungen besser geeignet, eine den Ansprüchen künftiger Generationen gerecht werdende Entsorgung zu gewährleisten, dann könnte es aus ethischer Sicht sogar geboten sein, dass diesen gegen eine zwangsfrei akzeptierte Kompensation die Entsorgung übertragen wird.

Angesichts der weit in die Zukunft hineinragenden Folgen einer Entscheidung über Strategien zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle muss auch und gerade eine Reflexion über die möglichen Konflikte mit Angehörigen künftiger Generationen wesentlicher Teil der Entscheidungsvorbereitung sein. Eine Reichweitenbeschränkung auf diejenigen, die mit uns gleichzeitig interagieren oder auf eine festgelegte zeitliche Reichweite (z. B. n Generationen) ist wegen der Irrelevanz aller Gründe einer Grenzziehung für ethisch-rationale Konfliktbewältigungsinteressen nicht tragfähig.

Mit Blick auf konkrete Handlungen besteht eine Verpflichtung daher immer genau so lang, wie ihre Folgen Konfliktpotential erzeugen. Die Verpflichtungen, die mit der Entsorgung hochradioaktiver Substanzen einhergehen, bestehen zeitlich also so lange wie das Gefährdungspotential der radio- und chemotoxischen Substanzen.

Es ist *aus ethischen* Gründen zwischen der universalistisch, d. h. unbegrenzt bestehenden *Verpflichtung* einerseits und einem nach räumlicher, sozialer und temporaler Ferne abnehmenden Grade ihrer *Verbindlichkeit* zu unterscheiden. Indem wir im Rahmen unserer moralischen Praxis die Verpflichtung gegenüber den nahestehenden Generationen mit einem höheren Grade an Verbindlichkeit versehen (und diesen eine Verpflichtung gegenüber den ihnen nahestehenden zuschreiben), organisieren wir die Langzeitverpflichtung und machen sie praktisch bewältigbar. Dabei ist allerdings das Maß, in dem Verbindlichkeit abnimmt, nicht fest mit der zeitlichen Entfernung, sondern mit unseren Potentialen, Verpflichtung planvoll und kontrolliert wahrzunehmen, korreliert. Wie weitreichend dieses Potential ist, darauf haben die moralischen Akteure Einfluss – und es ist Teil ihrer Verpflichtung, im Rahmen der Verhältnismäßigkeit der Mittel diese Einflussmöglichkeiten wahrzunehmen. So besteht, wenn wir technisch handeln wollen, auch eine Verpflichtung, uns Wissen über die Folgen und deren Konfliktpotential zu beschaffen. Ebenso geht mit der Vergrößerung der Reichweite unseres Handelns durch Kollektivierung und Technisierung die Verpflichtung einher, Institutionen auszubilden und mit den erforderlichen Ressourcen auszustatten, die auf der Grundlage des gewonnenen Wissens oder rational begründeter Vermutungen die gesellschaftliche Langzeitverpflichtung organisieren können, ohne von den Ressourcenbeschränkungen der einzelnen Akteure abhängig zu sein. Insbesondere erfordert auch die advokatorische Vertretung künftiger Ansprüche eines durch prozedurale Organisation legitimierten, institutionell verankerten und gesellschaftlich kontrollierten Mandats – Vertretungsrechte können nicht einfach durch Erklärung der eigenen Kompetenz, Zuständigkeit oder (vermeintlichen) Betroffenheit reklamiert werden. Die Akteure schaffen damit „Verantwortung“, treten aber nicht ihre Verpflichtung ab – es verbleibt vielmehr die weitere Aufgabe, über die Dauer sicherzustellen, dass die Verpflichtung auch verantwortlich wahrgenommen wird.

Bei der Optimierung komplexer Planungen mit hohem Konfliktpotential ist die Partizipation aller Orts- und Sachkundigen unabhängig von zertifizierter Qualifikation und Profession im Sinne der Planoptimierung und Verfahrenskontrolle prinzipiell wünschenswert. Die Einbeziehung von direkt Betroffenen in komplexe Planungen kann dazu beitragen, durch Abbau von Misstrauen und Ängsten die sozialen Voraussetzungen für einen rationalen Diskurs zum Zwecke der Konfliktbewältigung zu schaffen. Partizipative Verfahren sind dabei so zu gestalten, dass das Entscheidungsverhalten der Entscheidungsverantwortlichen nicht durch implizite oder ex-

plizite Interessenvertretung der Präsentischen verzerrt („biased“) wird, sondern an den Ansprüchen aller, auch der nicht partizipierenden Angehörigen künftiger Generationen ausgerichtet bleibt.

Der von Teilen der Öffentlichkeit und Teilen der Fachcommunity vorgebrachten Erwartungen, Partizipation könne auch zu Legitimation von Entscheidungen beitragen, ist mit Skepsis zu begegnen. Insbesondere sollte die Einbeziehung partizipativer Verfahren in die Entscheidungsvorbereitung nicht dazu führen, dass die Verantwortung, die von den Bürgern als Träger der Langzeitverpflichtung delegativ auf Institutionen übertragen wurde, von den Institutionen auf die Bürger zurückübertragen wird („Kompetenzzuweisungs-Zirkel“). Die als Begründung vorgebrachte Auffassung, der Einzelne sei doch letztlich der beste Kenner seiner Bedürfnisse und Interessen und könne sie daher auch am besten vertreten („Eigenkompetenzthese“) verkennt dabei, dass es gerade um die Gestaltung eines Ausgleichs zwischen einer disparaten Menge von Interessen geht, für die keine Teilklasse repräsentativ sein kann und die daher auch nicht durch einzelne Interessenträger repräsentativ vertreten werden kann. Modelle, die die Entscheidungskompetenz auf den Bürger zurückübertragen wollen, gehen dabei nicht selten von einem Bild aus, das die gesamtgesellschaftliche Entscheidungsbildung als eine antagonistische Verhandlung zwischen gesellschaftlichen Teilsystemen beschreibt, unter der „die Politik“, „die Wissenschaft“ und „die Öffentlichkeit“ quasi nur als gleichberechtigte Stämme unter anderen ihre jeweiligen Interessen vertreten („Tribalisierungsthese“). Dabei werden der methodisch organisierte Erkenntnisdiskurs der Wissenschaften und der institutionell organisierte Entscheidungsdiskurs der Politik, die gerade den zentrifugalen Prozessen subjektiver Meinungs- und Interessenbildung entgegenwirken sollen, mit bloßer Meinungs- und Interessenvertretung seitens der beteiligten Individuen verwechselt. Gerade aber in Entscheidungsfragen, in denen die Ansprüche einiger Konfliktparteien (wie etwa die der Angehörigen künftiger Generationen) nur begründet zugeschrieben und advokatorisch vertreten werden können, ist die legitimatorische Kraft von Prozeduren von großer Bedeutung. Eine Veränderung oder Erweiterung der Prozeduren, die durch Partizipation präziser und differenzierter auch auf die konfliktrelevanten Ansprüche und die Orts- und Sachkunde der Präsentischen reagiert, ist wünschenswert, muss aber mit der Verpflichtung gegenüber den Angehörigen zukünftiger Generationen abgewogen werden.

1.4 Rechtsfragen

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wirft komplexe Rechtsfragen auf. Von prinzipieller Bedeutung sind dabei die Ausgestaltung der Verantwortung des Staates, die Vermeidung institutioneller Konflikte, die Prinzipien der nuklearen Entsorgung und der – verfassungsrechtlich gebotene oder rechtspolitisch sinnvolle – Grad an Verrechtlichung. In diesem groben Rahmen stellt sich eine ganze Reihe komplexer Teilfragen.

Auf *internationaler Ebene* ist das Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit des Umgangs mit abgebrannten Brennstäben und die Sicherheit der Entsorgung radioaktiver Abfälle von 1997 (International Atomic Energy Agency – IAEA) für die Entwicklung der Grundsätze der nuklearen Entsorgung und des institutionellen Rahmens der Regulierung von besonderer Bedeutung. Außerdem gibt es eine Reihe relevanter Empfehlungen der IAEA und anderer Organisationen wie insbesondere der International Commission for Radiological Protection (ICRP).

Die *Europäische Union* hat bisher nur in begrenztem Umfang Regelungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle erlassen. Zu nennen sind die Gesundheitsnormen nach der Euratom-Richtlinie 96/29, die für den Strahlenschutz gelten, und die Richtlinie über die Sicherheit der Zwischenlagerung und Behandlung abgebrannter Brennstäbe. Ein Kommissionsvorschlag von 2010 sieht nunmehr auch die Einführung von Regelungen über die nukleare Endlagerung vor, die zu gewissen Anpassungen des deutschen Rechts nötigen werden.

Die Untersuchung ist *rechtsvergleichend* angelegt. Sie vergleicht die Regulierung der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in wichtigen Nuklearstaaten wie USA, Frankreich, Großbritannien, Schweiz, Schweden, Finnland, Spanien und Japan (erfolgt im Haupttext nur zusammenfassend, während die Einzelheiten im Anhang wiedergegeben werden). Die Vergleichung zeigt eine Reihe von Gemeinsamkeiten, aber doch auch erhebliche Unterschiede, die auf vielfältigen Faktoren beruhen. Diese Vielfalt schließt es aus, allgemein gültige Folgerungen aus den ausländischen Erfahrungen zu ziehen. Jedoch vermitteln diese Erfahrungen eine Reihe wichtiger Denkanstöße. Hervorzuheben ist, dass als Reaktion auf die überall, wenngleich in unterschiedlicher Stärke, spürbaren Akzeptanzprobleme bei der Standortwahl es eine deutliche Tendenz zur Einführung neuer Formen der Partizipation bei der Strategieentwicklung und insbesondere der Standortauswahl gibt. Die guten Erfahrungen in Schweden und Finnland mit diesen Verfahren lassen sich allerdings aus mancherlei Gründen nicht verallgemeinern. In den anderen betreffenden Staaten steht das neue Entscheidungsmodell noch auf dem Prüfstand.

Die *Verantwortung des Staates* für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung in Deutschland ist in erheblichem Maße verfassungsrechtlich determiniert. Art. 20a GG macht den Schutz künftiger Generationen ausdrücklich zur Staatsaufgabe. Das Atomgesetz enthält anspruchsvolle Anforderungen an die Zulassung nuklearer Endlager. Nach der Rechtsprechung ist die bestmögliche Gefahrenabwehr und Risikovorsorge nach dem Maßstab der praktischen Vernunft Standard der staatlichen Pflichten. Allerdings räumt die Rechtsprechung der Legislative und im Rahmen des Atomgesetzes auch der Exekutive die Letztverantwortung für die Ermittlung und Bewertung der betreffenden Risiken und die Entscheidung über ihre Tolerabilität ein.

Das Atomgesetz schreibt vor, dass der Bund Endlager für radioaktive Abfälle selbst oder durch obere Bundesbehörden wie das Bundesamt für Strahlenschutz betreibt. Auch Dritte können mit der Erfüllung dieser Pflichten beauftragt oder sie können hiermit beliehen werden. Im Hinblick auf die Langfristigkeit der Aufgaben erscheint das Modell der Beleihung trotz unbestreitbarer Vorzüge allerdings nicht unproblematisch.

Das Atomgesetz konzentriert Managementaufgaben und Überwachungspflichten beim Betrieb von Endlagern für hochradioaktive Abfälle beim Bundesamt für Strahlenschutz, das grundsätzlich weisungsgebunden ist. Dies ist mit dem in dem Gemeinsamen Übereinkommen und den IAEA-Empfehlungen verankerten Grundsatz der effektiven Unabhängigkeit von Management und Regulierung noch vereinbar, weil die Überwachung im Bundesamt innerorganisatorisch selbständig ist. Eine Reform der Zuständigkeiten erscheint jedoch sinnvoll.

Die *grundlegenden strategischen Optionen* für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle sind im Atomgesetz niedergelegt (teilweise, wie hinsichtlich des Grundsatzes der geologischen Endlagerung, allerdings nicht explizit). Dagegen unterliegen viele wichtige Strategieelemente der Entscheidung der Exekutive, die sich hierbei am Grundsatz der bestmöglichen Gefahrenabwehr und Vorsorge orientieren muss. Für den Grundwasserschutz gilt der Besorgnisgrundsatz nach dem Wasserhaushaltsgesetz. Das Bundesumweltministerium hat im Herbst 2010 Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle veröffentlicht, die im Zuge der weiteren Erkundung von Gorleben fortentwickelt werden sollen.

Problematisch in rechtlicher Sicht sind insbesondere der Zeitrahmen der Vorsorge in der Nachbetriebsphase und damit verbunden die Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Ein praktischer Ausschluss jeglichen Risikos muss nicht bis zum (fast) völligen Abklingen der Radioaktivität der eingelagerten Abfälle, sondern nur für einen solchen Zeitraum sichergestellt sein, wie dies nach dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik, einschließlich der Prognosefähigkeit, möglich ist. Darüber hinaus müssen die Risiken so weit wie vernünftiger Weise möglich reduziert werden. Dies stellt bestmögliche Gefahrenabwehr und Risikovorsorge im Sinne des Atomgesetzes dar.

Die *Standortwahl für atomare Endlager* in Deutschland zeichnet sich bisher durch einen geringen Grad an Verrechtlichung aus. In Reaktion auf die als technokratisch empfundene Auswahl des Salzstocks in Gorleben als Standort für das Endlager für hochradioaktive Abfälle in den achtziger Jahren sind verschiedene Vorschläge gemacht worden, die Standortsuche neu zu beginnen. Obwohl die Bundesregierung nunmehr entschieden hat, die untertägige Erkundung in Gorleben ohne Berücksichtigung von Alternativen wieder aufzunehmen, erscheint es sinnvoll, sich erneut mit der Standortwahl zu befassen, da weder die Eignung von Gorleben feststeht noch bekannt ist, ob es nicht eine besser geeignete Alternative gibt.

Aus verschiedenen Gründen kommt weder das atomrechtliche Planfeststellungsverfahren noch die Raumordnung des Bundes für ein Standortauswahlverfahren in Betracht. Sinnvoll und rechtlich möglich wäre es dagegen, ein der Planfeststellung vorgeschaltetes Fachplanungsverfahren entsprechend dem abfallrechtlichen Bewirtschaftungsplan einzuführen. Verfassungsrechtlich geboten ist ein solches Auswahlverfahren im Hinblick auf die Letztverantwortung des Gesetzgebers und der Exekutive für die Tolerabilität nuklearer Risiken nicht. Bei der Ausgestaltung des Verfahrens sollte sich der Gesetzgeber grundsätzlich am Optimierungsgebot orientieren, das aus dem gesetzlichen Grundsatz der bestmöglichen Gefahrenabwehr und Risikovorsorge abzuleiten ist. Allerdings ist die Sicherheit eines Endlagers das Produkt einer Kombination von geologischen und technischen Barrieren an einem bestimmten Standort. Das Optimierungsgebot kann daher nicht isoliert in Bezug auf das Wirtsgestein an einem bestimmten Standort verfolgt werden.

Obwohl Gründe der Legitimität und Akzeptanz für die völlige Wiederaufnahme des Standortauswahlverfahrens mit einer neuen Verfahrensstruktur sprechen mögen, hält sich die Entscheidung, die untertätige Untersuchung von Gorleben fortzusetzen, im Rahmen der Letztverantwortung der Exekutive und kann auch pragmatisch gerechtfertigt werden. Sinnvoll ist es aber, parallel zu der weiteren untertätigen Untersuchung von Gorleben Alternativstandorte zu prüfen und hierfür ein *modernes Auswahlverfahren* zu schaffen, das mit dem Fortgang der Untersuchungen in Gorleben verknüpft ist. Diese Vorgehensweise wirkt übermäßigen Verzögerungen der Standortsuche für den Fall des Scheiterns von Gorleben entgegen. Darüber hinaus ermöglicht sie aus Gründen guter Sachpolitik und Legitimität, dass auch bei Eignung von Gorleben eine intensive Untersuchung und gegebenen Falls die Wahl einer Standortalternative durchgeführt wird, die sich im parallelen Auswahlverfahren als vermutlich eindeutig überlegen erwiesen hat.

Das Auswahlverfahren könnte auf der Grundlage von Auswahlkriterien, die die Exekutive unter Beteiligung einer unabhängigen Expertenkommission und der Öffentlichkeit vorzugeben hat, in acht bis neun Verfahrensstufen ablaufen, sollte transparent sein und eine umfassende Beteiligung aller Betroffenen und Interessenträger ermöglichen. Die herkömmliche Partizipation sollte zur Verbesserung der Legitimität und Akzeptanz der betreffenden Entscheidungen angereichert werden. Zu den Elementen einer Neugestaltung gehören insbesondere die Einschaltung einer unabhängigen Expertenkommission, die Möglichkeit einer frühzeitigen Einflussnahme der Betroffenen und Interessenträger auf die Gestaltung und Planung des Suchprozesses, auf lokaler/regionaler Ebene die Errichtung eines permanenten Dialogforums und die Zugriffsmöglichkeit der Betroffenen und Interessenträger auf einen Pool unabhängiger Sachverständiger.

Abgesehen von der Feststellung der Eignung des Standorts soll das gesetzlich vorgesehene Planfeststellungsverfahren sicherstellen, dass *Bau und*

Betrieb der Anlage den gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Hierzu gehört die Einhaltung der Anforderungen der Strahlenschutzverordnung ebenso wie der Nachweis der Anlagensicherheit und der Grundwasserschutz, für den der Besorgnisgrundsatz maßgeblich ist. Die gesetzlichen Anforderungen gelten im Grundsatz, wenngleich mit Modifikationen, die durch die Langfristigkeit der Regulierungsaufgabe bedingt sind, auch für die Nachbetriebsphase der Anlage. Die Strahlenschutzverordnung, die auf nukleare Anlagen mit laufendem Betrieb zugeschnitten ist, kann zumindest als Richtschnur für den Strahlenschutz in der Nachbetriebsphase herangezogen werden.

Das Atomgesetz weist die *finanzielle Verantwortung* für die Endlagerung radioaktiver Abfälle den Betreibern der Kernkraftwerke zu. Sie sind verpflichtet, finanzielle Beiträge für die Deckung der erforderlichen Kosten, unter anderem auch für die Planung der Anlagen, zu erbringen. Da die Standortauswahl darauf abzielt, die Voraussetzungen für die Errichtung eines Endlagers zu schaffen und den Betreibern daraus Vorteile erwachsen, handelt es sich bei den Kosten der Standortauswahl um notwendige Kosten, soweit das Verfahren gesetzlich geboten und nicht nur rein politisch etabliert ist.

Eine Schwäche des geltenden Rechts liegt darin, dass sich die Pflichten der Betreiber in Bezug auf künftige Finanzierungslasten auf die Bildung von Rückstellungen beschränken. Im Hinblick auf die Langfristigkeit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wirkt diese Regelung Probleme für den Fall der Insolvenz oder Liquidation eines Abfallerzeugers auf, soweit es sich um Tochtergesellschaften der Energieerzeuger handelt. Bei Beendigung des bestehenden Unternehmensvertrags aufgrund Insolvenz oder Liquidation beschränkt sich die Haftung der Muttergesellschaft auf bereits begründete Verbindlichkeiten. Es ist zweifelhaft, ob die abstrakte gesetzliche Verpflichtung zur Tragung der künftigen, noch nicht absehbaren Kosten der Entsorgung als eine bereits „begründete“ Verbindlichkeit angesehen werden kann. Diese Zweifel könnten durch eine Mithaftung der Muttergesellschaft des Betreibers unabhängig vom Bestand des Unternehmensvertrags, insbesondere auch wenn der Betrieb nicht fortgesetzt wird, gelöst werden. Die gesetzliche Haftung der Muttergesellschaft für Verbindlichkeiten der Tochtergesellschaft im Fall eines Gewinnabführungsvertrages bleibt natürlich unberührt. Von Fondslösungen ist abzuraten.

1.5 Leitlinien für eine sozial verträgliche und gerechte Standortbestimmung

Die Endlagerfrage mobilisiert Menschen, und zwar nicht nur in Deutschland, sondern weltweit. Die Endlagerfrage ist symbolisch überhöht: Es geht nicht mehr allein und auch nicht mehr vordringlich um die Frage der technischen Machbarkeit, nicht einmal mehr um die langfristige Sicherheit, sondern um grundlegende Perspektiven gesellschaftlicher Entwicklung:

Wollen wir weiterhin zentrale, hoch effiziente, mit hoher Energiedichte versehene, aber gleichzeitig riskante Technologien in der Energieerzeugung? Oder wollen wir lieber auf dezentrale, oft wenig effiziente, auf geringe Energiedichte basierende und in ihren Auswirkungen nicht unbedingt risikoarme, aber lokal begrenzte Technologien setzen?

Diese Ausgangslage bestimmt die Bedingungen für eine künftige Lösung der Frage nach der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Das Thema „Endlagerung“ ist emotional hoch besetzt; es löst bei vielen Menschen Ängste aus. Dazu einige empirische Ergebnisse:

- Bei allen Befragungen belegt die nukleare Endlagerlösung Spitzenplätze in der öffentlichen Wahrnehmung von Bedrohlichkeit. Das ist weltweit so, interessanterweise auch in Finnland, wo das Problem der Endlagerung trotz dieser öffentlichen Besorgnis politisch weitgehend gelöst werden konnte.
- Die Komplexität dieses Sachverhalts wird deutlich, wenn man die Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage aus den Jahren 2001 und 2002 betrachtet: Während zum Zeitpunkt des Surveys circa 65 % der Befragten davon ausgingen, dass innerhalb der nächsten zehn Jahre ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zur Verfügung stehen wird, lehnten gleichzeitig 81 % der Befragten ein Endlager in ihrer unmittelbaren Wohnumgebung ab. Dieses klassische *NIMBY-Syndrom* („Not in my backyard!“) ist ein Kennzeichen von Standortfindungsprozessen für großtechnologische und risikobezogene Anlagen. Die Notwendigkeit der Technologie wird im Prinzip bejaht, jedoch möglichst weit weg vom eigenen Wohnort.
- Bei Untersuchungen zur Stakeholder-Mobilisierung gibt es weltweite Unterschiede, aus denen man viel lernen kann. Einige Länder wie Finnland, Schweden und die Schweiz haben Fortschritte bei der Lösung der Endlagerung gemacht. Eine institutionell befriedigende und für die meisten Menschen tolerierbare Lösung ist bei richtiger Vorgehensweise nicht unmöglich. Es ist aber nicht einfach, ein Verfahren zu finden, das auf Akzeptanz stoßen wird. Es gibt auch niemals eine Garantie für ein Gelingen. Nur: Wenn man es falsch macht, gibt es die Garantie, dass man scheitert.

Warum ist die Risikowahrnehmung der nuklearen Endlagerung so emotional hoch geladen? Aus psychologischer Sicht sind die Risiken der nuklearen Stromerzeugung insgesamt aber auch der Endlagerung in der Wahrnehmung der Bevölkerung dem semantischen Muster „Schwert des Damokles“ zuzuordnen. Semantische Muster haben ähnliche Funktionen wie Schubladen in einem Aktenschrank. Wenn man mit einem neuen Risiko konfrontiert wird oder wenn man eine neue Information zum Risiko aufgenommen hat, versuchen Menschen in der Regel, diese neuen Informationen in eine der bestehenden Schubladen einzuordnen.

Darunter fällt auch das Muster des Damokles-Schwertes. Dabei geht es um technische Risiken, bei denen, unabhängig davon, ob diese Zuschreibung gerechtfertigt ist oder nicht, ein hohes Schadenspotential mit einer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden wird. Die stochastische Natur eines solchen Ereignisses macht eine Voraussage über den Zeitpunkt des Eintritts unmöglich. Folglich kann das Ereignis in der Theorie zu jedem Zeitpunkt eintreten, wenn auch mit jeweils extrem geringer Wahrscheinlichkeit. Wenn wir uns jedoch im Bereich der Wahrnehmung von seltenen Zufallsereignissen befinden, spielt die Wahrscheinlichkeit eine geringe Rolle: Die Zufälligkeit des Ereignisses ist der eigentliche Risikofaktor. Die Vorstellung, das Ereignis könne zu jedem beliebigen Zeitpunkt die betroffene Bevölkerung treffen, erzeugt das Gefühl von Bedrohtheit und Machtlosigkeit. Instinktiv können die meisten Menschen mental (ob real mag hier dahin gestellt bleiben) besser mit Gefahren fertig werden, wenn sie darauf vorbereitet und darauf eingestellt sind.

Dazu kommt noch die schleichende Gefahr der Radioaktivität, die man nicht sinnlich wahrnehmen kann. Damit sind wir bei einem zweiten semantischen Muster, das häufig angstausslösend wirkt. Im Rahmen dieses Risikomusters nehmen Menschen zu Recht an, dass wissenschaftliche Studien schleichende Gefahren frühzeitig entdecken und Kausalbeziehungen zwischen Aktivitäten oder Ereignissen und deren latente Wirkungen aufdecken können.

Im Falle des semantischen Musters „Schleichende Gefahr“ sind die betroffenen Menschen auf Informationen durch Dritte angewiesen. Sie können die Gefahren in der Regel nicht sinnlich wahrnehmen, noch die Behauptungen der sich häufig widersprechenden Experten nachprüfen. Bewerten Laien diese Risiken, dann stoßen sie auf eine Schlüsselfrage: Vertraue ich den Institutionen, die mir dazu die notwendigen Informationen geben, ja oder nein? Ist die subjektive Einschätzung negativ, dann wird kompromisslos ein Nullrisiko gefordert. Denn wer bei der Bewertung solcher Risiken auf Informationen durch Dritte angewiesen ist, diesem Dritten aber nicht vertraut, der lässt sich auf keine Kosten-Nutzen-Bilanz ein, sondern fordert die Nullbelastung. Ist er dagegen unentschieden, ob er vertrauen kann oder nicht, dann werden periphere Merkmale besonders wichtig, Merkmale, die mit der Entscheidungslage sachlich nicht verknüpft sind. Der Laie hat aber keine andere Möglichkeit, als Vertrauen nach peripheren Merkmalen zu verteilen, denn er kann das Risiko, durch radioaktive Strahlung zu Schaden zu kommen, nicht selbst untersuchen. Er muss irgendeiner Seite trauen oder gar nicht trauen.

Diese Muster sind tief in unbewusste Bewertungsprozesse der Wahrnehmung eingebunden. Sie lassen sich nur dann überwinden, wenn die Menschen diese Wahrnehmungsmuster selbst begreifen lernen und deren Wirkung als unbewusste Bewertungsmaßstäbe der eigenen Urteilsfindung erkennen können. Risikokommunikation kann sich daher nicht auf

die Vermittlung der wissenschaftlichen Einsichten über Risiken beschränken, sondern muss auch die Mechanismen der Risikowahrnehmung plastisch vermitteln.

Selbst wenn man, wie dies in jüngster Zeit zunehmend geschieht, in einen intensiven Risikodialog eintritt, ist damit die Konfliktsituation keineswegs aufgelöst. Die Schaffung einer Kommunikationsbasis ist vielmehr die Voraussetzung, aber keineswegs die hinreichende Bedingung dafür, dass es zu einer allgemein akzeptierten Lösung kommen kann. Im Prinzip lassen sich aufgrund der gegebenen Verhältnisse drei prinzipielle Vorgehensweisen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle skizzieren:

Im *Top-Down-Ansatz* haben die durch die demokratische Gesellschaftsordnung gewählten Staatsvertreter die alleinige Entscheidungsbefugnis inne. Kraft ihres Amtes entscheiden sie zum Wohle des Volkes. Eine aktive Beteiligung der Bürger ist hierbei, wenn überhaupt, nur sehr restriktiv vorgesehen. Allerdings beruht auch diese Lösung auf einer transparenten und den Bürger einbeziehenden Risikokommunikation. Die Bürger dürfen ihre Meinung in Anhörungen oder Erörterungsterminen einbringen, jedoch gibt es keine Garantie auf Einflussnahme in der finalen Entscheidungsfindung. Die Entscheidungsträger müssen auch nachweisen, dass alle Einwände ordnungsgemäß behandelt wurden. Dann aber liegt es in den Händen der Entscheidungsträger, eine Entscheidung unter Offenlegung der Argumente für und wider zu treffen.

In einer *Muddling-Through-Strategie*, einer pragmatischen Mischung aus Top-Down- und Bottom-up-Ansatz, kann man sich auf die im politischen Meinungsprozess gewachsenen Minimalkonsense (Muddling Through) verlassen. Als legitim werden nur solche Entscheidungsoptionen angesehen, die den geringsten Widerstand in der Gesellschaft hervorrufen. Gesellschaftliche Gruppen nehmen in dieser Steuerungsvariante insoweit auf den Prozess der Willens- und Entscheidungsbildung Einfluss, wie sie anschlussfähige, d. h. dem Sprachcode und dem Verarbeitungsstil des politischen Steuerungssystems angepasste, Vorschläge liefern und öffentlichen Druck mobilisieren. In der Politik setzt sich dann der Vorschlag durch, der sich im Wettstreit der Vorschläge am besten behauptet, d. h. der für die politischen Entscheidungsträger die geringsten Einbußen an Unterstützung durch Interessengruppen mit sich bringt. Die bisherige Auseinandersetzung um die Endlagerung scheint weitgehend einem solchen Muddling Through zu entsprechen.

Die dritte Variante – der *Bottom-up-Ansatz* zur diskursiven Standortbestimmung – setzt auf eine diskursive Lösung und auf den Versuch einer fairen Aushandlung der Standortfindung zwischen den beteiligten Gruppen. Diskursive Verfahren erheben den Anspruch, rationalere (im Sinne eines diskursiven Vernunftverständnisses), gerechtere (im Sinne eines verhandlungsbasierten Gerechtigkeitsverständnisses) und kompetentere Lösungen von Problemen zu ermöglichen. Gleichgültig welche

Ansprüche man im Einzelnen mit diskursiven Prozessen verbindet: Sie müssen nach bestimmten Regeln strukturiert sein, um ihre Leistungsfähigkeit zu gewährleisten, um etwa konstruktive Problemlösungen sachgerecht und fair bereitzustellen und mehrere Entscheidungsoptionen offen zu halten, und um strategische Verhaltensweisen der Teilnehmer so weit wie möglich zu verhindern. Im Prinzip ist die Legitimation von kollektiv verbindlichen Normen an drei Bedingungen geknüpft: Zustimmung aller Beteiligten, substantielle Begründung der im Diskurs gemachten Aussagen sowie angemessener Ausgleich von negativ betroffenen Interessen und Werten.

Wie ließe sich eine sinnvolle Kombination aus bottom up und top down realisieren? Das gesamte Auswahlverfahren muss transparent und nachvollziehbar sein (Kriterium der effektiven Risikokommunikation). Das Auswahlverfahren muss gegenüber Nichtbeteiligten als fair (alle beteiligten Interessen- und Wertgruppen kommen zu Wort), kompetent (dem Problem angemessen und mit der notwendigen Sachkenntnis versehen) und effizient (die Mittel bez. Entscheidungskosten sind den Zielen angemessen) erscheinen. Die Auswahl selbst muss in ihrem normativen wie kognitiven Gehalt nachvollziehbar und intersubjektiv begründbar sein und sollte die pluralen Wertvorstellungen der betroffenen Bürger im Sinne eines fairen Konsenses oder Kompromisses widerspiegeln.

Wollte man alle diese Forderungen zur Legitimation des Standortauswahlprozesses erfüllen, so dürfte ein einziges politisches Steuerungsinstrument mit Sicherheit nicht ausreichen. Vielmehr verlangen Entscheidungen von so großer Reichweite eine Aneinanderreihung verschiedener Steuerungsinstrumente, die jeweils unterschiedliche Teilforderungen abdecken.

Um die genannten Grundsätze einzuhalten, müssen mehrere Schritte und Komponenten kombiniert werden. Zunächst bedarf es einer wissenschaftlich-technischen Übereinkunft über die Eignung von Standortkonzepten und über die Kriterien in Form von Schwellenwerten, welche erreicht werden müssen, damit ein Standort unter dem Aspekt der Langzeitverantwortung als geeignet gelten kann. Diese Kriterien müssen festgelegt werden, bevor die Ergebnisse der Eignungsprüfung vorliegen. Das sollte auf der Grundlage von konsensorientierten Methoden der wissenschaftlichen Prüfung erfolgen, die unabhängig, sachbezogen und transparent angewandt werden müssen. Um das zu institutionalisieren, braucht man eine neutrale Plattform unter professioneller Führung, bei der Wissenschaftler auf nationaler Ebene unter Einbeziehung internationaler Experten (das erhöht die unverzichtbare Glaubwürdigkeit) zusammenkommen, mit dem Ziel, den hier geforderten Wissenskonsens herbeizuführen. Um auch gegenüber der Öffentlichkeit zu dokumentieren, dass hier keine einseitige Auswahl der Experten stattfindet, kann man ein Nominierungsrecht von Stakeholdern vorsehen.

Zum zweiten benötigt man einen fairen Ausgleich für die Übernahme von Unsicherheiten. Ziel ist es hier, eine robuste, allseits akzeptierte Lösung zu finden, um vorausschauend mit Unsicherheiten umzugehen. Verfahren, wie die Mediation oder die Einrichtung eines Runden Tisches mit Stakeholdern können zu einem als gerecht empfundenen Ausgleich von Unsicherheitsfolgen führen. Hier ist es besonders wichtig, die Unsicherheiten, vor allem die über die Langzeiteffekte, nicht zu verschweigen, sondern offen anzusprechen und Ausgleichsmöglichkeiten zu schaffen, indem man gleichzeitig etwas für die Wirtschaftsförderung oder für die Standortentwicklung tut. Dabei geht es nicht um „Ablasshandel“ oder eine korrumpierende Bezahlung von Risikoübernahme, sondern um auch in anderen Lebensbereichen übliche Formen des sozialen Ausgleichs: Diejenigen, die unsichere Folgen und Belastungen in Zukunft für die Allgemeinheit tragen sollen, sollen dafür auch von der Gemeinschaft anerkannt bzw. unterstützt werden. Dieses Vorgehen zeigt, dass die Übernahme von Unsicherheit respektiert und honoriert wird. Man kann nicht verlangen, dass die Unsicherheit schweigend „geschluckt“ wird. Dafür sind neutrale Dialogforen mit den von den Folgen betroffenen Gruppen am besten geeignet. Am Beispiel Schwedens lässt sich lernen, dass diese Foren möglichst lokal besetzt sein sollten. Experten werden dabei als Wissensquellen und Auskunftspersonen fallweise hinzugezogen.

Dann folgt der dritte und letzte Bestandteil einer diskursiven Lösung: ein Forum zur gesellschaftlichen Orientierung über künftige Energieversorgung und postindustrielle Lebensstile. Die Debatte um Endlagerung ist mehr als eine Debatte um Abfallbehandlung, es geht vielmehr um die Frage: Wie wollen wir in Zukunft leben? Wie kann das Thema Endlagerung in einen konstruktiven Entwurf künftiger Lebensstile und Lebensbedingungen eingeordnet werden? Hier könnten diskursorientierte Methoden wie Bürgerforen, Runde Tische oder Konsensuskonferenzen, die sich in anderen Ländern teilweise gut bewährt haben, zum Einsatz kommen.

Die Reduzierung der Komplexität mithilfe eines Konsenses in der Wissenschaft über das beste Auswahlverfahren, die Bewältigung der Unsicherheit durch faire Angebote an diejenigen, die unter den Folgen der Unsicherheit werden leben müssen, und die Behandlung der Ambiguität durch einen offenen und ehrlich geführten Zieldiskurs über die Zukunft der Energieversorgung sind die Stichworte, die am Anfang einer neuen Initiative zur Lösung der Frage nach der verantwortlichen Entsorgung hochradioaktiver Abfälle stehen müssen. Nicht zuletzt ist ein gesellschaftlicher Diskurs über die Frage erforderlich, wie wir als rohstoffarmes Land in Zukunft bestehen können.

2 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

2.1 Ethische Grundlagen

- (1) **Verpflichtungen gegenüber künftigen Generationen gelten prinzipiell unbefristet. Entsorgungsstrategien für radioaktive Abfälle sind gleichwohl für befristete Zeiträume zu entwickeln.**

Verpflichtungen, die den Akteuren eine umsichtige Entsorgung radioaktiver Abfälle auferlegen, gelten prinzipiell unbefristet und bestehen – wenn auch in ihrer Verbindlichkeit graduell abnehmend – auch gegenüber den Angehörigen ferner Generationen. Die bei der Entwicklung von Entsorgungsstrategien einzubeziehenden komplexen Verläufe (die „Folgenräume“) sind gleichwohl aus rationalen Erfordernissen der Planung und aus Gründen der Effizienz zeitlich zu befristen. Eine solche Befristung sollte sich am voraussehbaren künftigen Wirkungspotential der Folgen orientieren, und damit am relativen, mit den Phasen des Zerfallsprozesses und der gewählten Entsorgungsstrategie variierenden Gefährdungspotential der Lagerinventare und möglicher Expositionen in der Biosphäre.

- (2) **Die jetzige Generation als primäre Nutznießerin der Kernenergie hat die Verpflichtung, die Lösung des Entsorgungsproblems einzuleiten. Die Forderung nach einer *unverzöglichen* Entsorgung hochradioaktiver Abfälle bürdet der jetzigen Generation jedoch nicht zu rechtfertigende Lasten auf.**

Die Inanspruchnahme moralischer Prinzipien, die den Angehörigen der gegenwärtigen Generation als Verursacher- und Nutznießergemeinschaft die vollständige Entsorgung auferlegen, ist aus ethischer Sicht keineswegs selbstverständlich. Sofern und solange nach belastbaren Prognosen über Generationen- oder Gemeinschaftsgrenzen verlässliche Tauschverhältnisse organisiert werden könnten und dieses nicht zu Lasten Dritter ginge, wäre etwa eine Übertragung der „Entsorgungsverantwortung“ gegen einen zwangsfrei akzeptierten Ausgleich ethisch unbedenklich. Die Forderung nach der Unverzögerlichkeit einer Problemlösung ist keinesfalls selbstverständlich und bedarf der Rechtfertigung. Ist es wahrscheinlich, dass eine künftige Generation, mit der wir in kontrollierbarer Interaktion stehen, über „bessere“ Entsorgungsstrategien verfügt, kann es gar geboten sein, diese Option zu ergreifen. Gerechtigkeitserwägungen erlegen dann allerdings dem Verursacher eine Pflicht zur angemessenen Kompensation auf. Dasselbe gilt auch, mutatis mutandis, für internationale Austauschbeziehungen: Für eine angemessene Wahrnehmung der Langzeitverpflichtung sind nicht die – angesichts der in Frage stehenden Zeiträume ohnehin eher historisch kontingent erscheinenden – Nationengrenzen, sondern die Verfügbarkeit von Kompetenzen und Ressourcen die relevanten Größen.

- (3) **Legitimierende Verfahren zur Lösung der Endlagerfrage sind so zu gestalten, dass sie allen in gleichem Maße gerecht werden und insbesondere auch die Ansprüche künftiger Generationen angemessen miteinbeziehen.**

Eine Ausgestaltung der legitimierenden Prozeduren, die auch auf die konfliktrelevanten Ansprüche und die Orts- und Sachkunde der gegenwärtig Lebenden reagiert, ist wünschenswert, muss aber mit den Verpflichtungen gegenüber den nicht an den Beratungen Beteiligten, insbesondere den Angehörigen zukünftiger Generationen, abgewogen werden. Maßstab für die Entscheidung darf daher nicht allein die prozedural hergestellte faktische Zustimmung von Angehörigen der gegenwärtigen Generationen sein. Die Entscheidung muss vielmehr auch im Sinne einer rational dargelegten, universalistisch geführten Begründung akzeptabel sein. In der öffentlichen Debatte sind diejenigen, für die eine Beteiligung nicht möglich ist oder für die es keine Anreize gibt, sich für ihre Ansprüche zu engagieren, advokatorisch zu vertreten. Die Verantwortung dafür ist legitimiert zu übertragen und darf nicht durch einzelne Interessenvertreter oder Interessengruppen einfach für sich reklamiert werden.

- (4) **Eine grundsätzliche Zurückweisung aller Lösungsvorschläge für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist nicht mit der Verpflichtung gegenüber zukünftigen Generationen verträglich.**

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist eine kollektive, gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Daraus ergibt sich nicht nur die Sorgfaltspflicht, unterbreitete Vorschläge daraufhin zu prüfen, ob sie im Sinne der Verpflichtung aussichtsreich sind, sondern auch die Verpflichtung, sich konstruktiv an der Entwicklung geeigneter Vorschläge zu beteiligen bzw. Strukturen zu bilden oder zu fördern, die eine solche Beteiligung ermöglichen. Das Vetorecht derer, die mit der mangelnden Eignung eines vorgeschlagenen Standortes oder auch mit der Untauglichkeit des Entsorgungskonzepts an sich argumentieren, ist an die Erwartung geknüpft, sich an der Entwicklung alternativer Vorschläge konstruktiv zu beteiligen. Aussichtsreiche Projekte und Prozesse, die auf die Entwicklung alternativer Vorschläge zielen, sind mit den erforderlichen Ressourcen zu unterstützen. Eine grundsätzliche Ablehnung aller Vorschläge ignoriert die Verpflichtung gegenüber künftigen Generationen.

- (5) **Die Instrumentalisierung künftiger Generationen für Argumente gegen längere Laufzeiten von Kernkraftwerken ist unzulässig.**

Es besteht gegenüber den Angehörigen künftiger Generationen eine Verpflichtung zur Entsorgung der bereits vorhandenen radioaktiven Abfälle. Die im Falle einer Laufzeitverlängerung von Kernkraftwerken zusätzlich anfallenden Mengen wären zu gering, als dass sie auf die Wahl der Entsorgungsstrategien wesentlichen Einfluss nehmen könnten. Die in Frage stehenden Verlängerungszeiträume sind angesichts der für die Endlagerung ohnehin zu

erwartenden langen Fristen ohne Bedeutung. Es wäre daher nicht zulässig, die Interessen künftiger Generationen zu instrumentalisieren, um auf Entscheidungen über die Laufzeiten von Kernkraftwerken steuernd einzuwirken.

2.2 Sicherheitsanforderungen und -ziele

- (6) Die umsichtige Entsorgung radioaktiver Abfälle setzt die Entwicklung einer angemessenen Gesamtstrategie hinsichtlich der Sicherheit und des Gesundheits- und Umweltschutzes voraus. Das Grundgesetz und das Atomgesetz geben einen klaren gesetzlichen Rahmen für eine bestmögliche Gefahrenabwehr und Risikovorsorge.

Die umsichtige Entsorgung radioaktiver Abfälle setzt die Entwicklung einer angemessenen Gesamtstrategie voraus, die alle einschlägigen technischen Bedingungen und Optionen einbezieht und auf der Grundlage schon getroffener Entscheidungen den Erfordernissen der technischen, sozialen und politischen Umsetzbarkeit genügt. Sowohl das deutsche Grundgesetz als auch das Atomgesetz geben hierfür einen eindeutigen normativen Rahmen, indem sie jede Lösung an die gesetzliche Forderung der bestmöglichen Gefahrenabwehr und Risikovorsorge binden. Allerdings wird dabei der Legislative und der Exekutive ein breiter Ermessensspielraum zugestanden.

Die Sicherheit eines Endlagers ist das Ergebnis einer Kombination geologischer und technisch hergestellter Barrieren an einem bestimmten Standort. Aufbauend auf dem internationalen Konsens hinsichtlich der herausgehobenen Bedeutung der geologischen Barrieren lässt sich sicher behaupten, dass die besten geologischen Barrieren ausgewählt und mit den besten technischen Barrieren verbunden werden sollen. Diese Kombination muss darum allerdings noch nicht notwendigerweise auch das höchste Maß an Sicherheit gewährleisten. So könnten etwa die Beschaffenheit des Wirtsgesteins und die lokalen geophysikalischen Bedingungen als limitierender Faktor für den Zugewinn an Sicherheit durch die technischen Barrieren wirken. Letztendlich ausschlaggebend muss die Sicherheit des Gesamtsystems sein.

- (7) Für die Beurteilung der langfristigen Sicherheit ist von Szenarien auszugehen, die auf der Beurteilung natürlicher Entwicklungen hinsichtlich des Potentials für einen Schadstofftransport durch Wirtsgesteine und Deckgebirge sowie potentielle radiologische Expositionen in die Biosphäre beruhen.

Die Bewertung der Strategien muss auf der Grundlage von Kriterien erfolgen, die die kurzfristigen wie die langfristigen Folgen für die Umwelt berücksichtigen und den Sicherheits- und Schutz-Bedürfnissen der Gegenwärtigen ebenso gerecht werden wie denen der Angehörigen künftiger Generationen. Für die Beurteilung der langfristigen Sicherheit sind Szenarien über natürlich induzierte Verläufe zu Grunde zu legen. Es ist zu untersuchen, in wie weit diese einen allmählichen Transport radioaktiver Substanzen durch geologische Wirtsgesteine und Deckgebirge herbeiführen können und daher mit dem Risiko ei-

ner Freisetzung in die Biosphäre und den entsprechenden Risiken für den Menschen bei Strahlenexpositionen an der Oberfläche oder bei unbeabsichtigtem Eindringen verbunden sind. Ferner muss Unterkritikalität des ins Endlager eingebrachten bestrahlten Brennstoffs und radioaktiven Abfalls gewährleistet werden; die entsprechenden Nachweise scheinen unproblematisch zu sein.

- (8) Die menschlichen Fähigkeiten, Prognosen über zukünftige Entwicklungen geologischer oder anthropogener Systeme über extrem lange Zeiträume zu entwickeln, sind begrenzt.**

Zu den ethischen Grundlagen gehört auch die Einsicht, dass die Einbeziehung ferner Gefahrenpotentiale, insbesondere der mit einer möglichen Freisetzung radioaktiver Substanzen verbundenen Risiken für den Menschen, aus planerischen Erfordernissen zeitlich zu befristen ist. In den bisherigen Debatten finden sich solche Fristsetzungen oft begründet mit dem Rückgang der Radiotoxizität über die Zeit hinweg. Die in den bisherigen Debatten angeführten Größenordnungen von 100.000 bis zu einer Million Jahren orientieren sich dabei meist an der Radiotoxizität natürlicher Uranerz-Vorkommen. Dem Vergleich liegt zu Grunde, dass bei diesem Zeitrahmen dieses Maß von den eingelagerten radioaktiven Abfällen unterschritten werden wird. Die menschliche Fähigkeit, Prognosen über die Entwicklung geogener oder anthropogener Systeme über sehr lange Zeiträume zu entwickeln, sind indes begrenzt. Modellrechnungen, die z. B. den Einschluss von Abfällen oder die Migration von Radionukliden in die Biosphäre beschreiben, werden zunehmend bedeutungslos, da die zugrunde liegenden Annahmen mit länger werdenden Prognosezeiträumen zunehmend ihre Rechtfertigung verlieren. Zwar lassen sich prinzipiell Anhaltspunkte für die weitere Entwicklung einer Verlaufskurve gewinnen, indem man den möglichen Verlauf über das Ende des vorhersehbaren Zeitrahmens hinaus extrapoliert. Demgegenüber steht aber die abnehmende Verlässlichkeit der Informationen, die aus solchen Berechnungen gewonnen werden können.

- (9) Der Zeitrahmen von einer Million Jahren für die Beurteilung der Langzeitsicherheit hochradioaktiver Abfälle erscheint als ein angemessener Kompromiss zwischen den ethisch begründeten Forderungen nach Langzeitverantwortung und den Grenzen der praktischen Vernunft.**

Der vielfach angeführte, insbesondere auch vom Bundesministerium für Umwelt (BMU) propagierte Zeitrahmen von einer Million Jahren ist mit der Fähigkeit begründet, Lagerstätten in einer geologischen Umgebung ausmachen zu können, von der nach aktuellem geowissenschaftlichen Kenntnisstand der Fortbestand ihrer günstigen Eigenschaften über einen Zeitraum dieser Größenordnung angenommen werden darf. Dieser Ansatz erscheint als ein vernünftiger Kompromiss zwischen den ethisch begründeten Forderungen auf der einen, und der Einsicht in die Beschränktheit der praktischen Fähigkeiten auf der anderen Seite.

- (10) Der Vorschlag, die Referenzdosis in Deutschland auf 10 μSv (0,01 mSv) festzusetzen, ist aus strahlenbiologischer Sicht abzulehnen; er weicht zudem stark vom internationalen Konsens von 100 μSv (0,1 mSv) pro Jahr ab.**

Der vorgeschlagene Richtwert einer effektiven Dosis von 10 μSv (0,01 mSv) pro Jahr für Lagerstätten wärmeerzeugender radioaktiver Abfälle während der Nachbetriebs-Phase sollte neu überdacht werden. Eine solche Strahlendosis stellt weniger als ein Prozent der durchschnittlichen Strahlendosis dar, die aus natürlichen Quellen (in Deutschland und vielen anderen Regionen weltweit) stammt und liegt damit weit im Schwankungsbereich der Expositionen aus natürlichen Quellen. Eine solche Strahlendosis ist um den Faktor 10 geringer als der international übliche Wert von 100 μSv (0,1 mSv) für wenig wahrscheinliche Situationen der Nachbetriebs-Phase. Die ICRP nennt die Dosis von 10 μSv (0,01 mSv) eine „triviale“ Dosis.

- (11) Untersuchungen über die Langzeitsicherheit sollten sich vorwiegend auf Radionuklide konzentrieren, die für die potentielle Strahlenexposition von Menschen von besonderer Relevanz sind.**

Anhand von Modellen lässt sich abschätzen, dass einige Radionuklide, die als leicht wasserlösliche Ionen vorliegen, für die Strahlenexposition der Menschen von besonderer Relevanz sind. Weitere Untersuchungen sollten sich besonders den Fragen widmen, wie ^{129}I , ^{14}C und ^{36}Cl im Lager festgehalten werden können, und erforschen, wie die Migration dieser Radionuklide besser verstanden und modelliert werden kann.

2.3 Entsorgungsprogramm und zeitlicher Ablauf

- (12) Es besteht eine hohe Evidenz für die technische Umsetzbarkeit einiger bereits entwickelter Konzepte für die Endlagerung.**

Die entwickelten Konzepte für eine Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, die den Sicherheits- und Schutz-Bedürfnissen der gegenwärtig Lebenden ebenso gerecht wird wie denen der Angehörigen künftiger Generationen, erscheinen prinzipiell als technisch umsetzbar. Umsetzungsstrategien müssen folgende Aspekte einbeziehen:

- (1) Unterscheidungen zwischen solchen radioaktiven Materialien, die als Abfall, und solchen, die als Ressource behandelt werden sollen;
- (2) eine Entscheidung, radioaktive Abfälle zu konzentrieren, in geeigneter Weise einzuschließen und sie in tiefegeologischen Formationen zu deponieren;
- (3) Unabhängigkeit von aktiven Maßnahmen nach Verschluss der Lagerstätten;
- (4) einen expliziten, gut abgestimmten Zeitplan für die Durchführung eines Entsorgungsprogramms.

- (13) Die Entwicklung eines Rahmenprogramms und eines Zeitplans für Deutschland wird empfohlen. Das Programm sollte so gestaltet werden, dass eine realistische Chance für sein Fortbestehen auch über Regierungswechsel hinweg besteht.**

Da es in Deutschland insbesondere an einem abgestimmten Rahmenprogramm und Zeitplan mangelt, ist die Entwicklung eines Programms zu empfehlen, das explizit die Prinzipien aufführt, die dem Konzept zugrunde liegen, die Optionen zur Umsetzung dieser Prinzipien vollständig erfasst, einen Ablauf festlegt, der bestimmt, welche Zeiträume der Forschung zur Verfügung gestellt werden müssen, wann zwischen alternativen Optionen eine verbindliche Auswahl getroffen werden muss, und der das Verfahren zur Standortbestimmung im Rahmen der bestehenden rechtlichen Regelungen strukturiert (vgl. hierzu die Entscheidungspfade in Abschnitt A 2.8). Ein solches zeitlich gegliedertes Programm entspräche der vorgeschlagenen EU-Richtlinie zum Umgang mit abgebrannten Brennstoffen und radioaktiven Abfällen.

Ein umfassendes Programm würde einen Anreiz schaffen für die Ausbildung eines systematischen und koordinierten Entsorgungs-Ansatzes. Er könnte zur erhöhten Transparenz des politischen Entscheidungshandelns beitragen, eine Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Entscheidungsvorbereitung unterstützen und damit insgesamt zur Verbesserung der faktischen Akzeptanz wie der ethischen Akzeptabilität beitragen.

- (14) Es muss klargestellt werden, auf welcher wissenschaftlich-technischen Grundlage, auf welcher Faktenbasis, mit welchem Verfahren und durch welche Institutionen die Entscheidungen getroffen werden sollen.**

Für jede im Programm vorzusehende Entscheidung ist offenzulegen, auf welcher wissenschaftlich-technischen Grundlage und Faktenbasis (z. B. Ergebnisse der Standorterkundung, der konzeptionell-technischen Endlagerentwicklung und der Sicherheitsbewertung, Inhalt des Genehmigungsverfahrens), mit welchem Verfahren und durch welchen Entscheidungsträger Entscheidungen getroffen werden sollen.

- (15) Das Rahmenprogramm sollte die Entsorgungsstrategie, das Verfahren und den Zeitplan für die Standortauswahl enthalten. Es sollte auch klarstellen, welche Entscheidungen schon getroffen und welche Maßnahmen schon ergriffen worden sind und welche davon ggf. als reversibel zu betrachten sind.**

Das Rahmenprogramm sollte explizit die bereits ergriffenen Maßnahmen und getroffenen Entscheidungen aufführen und kennzeichnen, welche davon als potentiell revidierbar zu betrachten sind und unter welchen Bedingungen eine Revision möglich wäre. Nach Einschätzung der Autoren führen die bisher in Deutschland getroffenen Entscheidungen zu wohlbestimmten Mengen radioaktiver Abfälle, die zur Entsorgung anstehen. Die sich ändernde Poli-

tik zur Wiederaufbereitung abgebrannter Brennstoffe hat dazu geführt, dass sowohl verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung als auch abgebrannte Brennstoffe auf ihre Entsorgung warten. Die abgebrannten Brennstoffe sind teils auf dem Reaktorgelände, teils in zentralen Anlagen zwischengelagert, in letzteren werden auch die verglasten Abfälle gesammelt. Abgebrannte Brennstoffe werden als Abfall eingestuft und sind damit zur Entsorgung in tiefengeologischen Formationen ohne aktive Kontrollmaßnahmen in der Nachbetriebsphase vorgesehen. Weitere Entsorgungsschritte unterliegen den folgenden politischen Vorgaben:

- den Prinzipien und Forderungen, die in den jüngsten Sicherheitsanforderungen des BMU aufgestellt werden, insbesondere denjenigen, die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich, die Maßnahmen zur Bergung sowie die Entwicklungs- und Optimierungsprozesse bei der Inbetriebnahme des Lagers betreffen;
- die Strategie, als Lagerstätten bevorzugt steile Steinsalzformationen in Aussicht zu nehmen.

(16) Eine Entsorgungsstrategie sollte für mögliche positive Anpassungen offen sein. Dies gilt auch für mögliche Fortschritte in Forschung und Entwicklung.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, bei gegebenen geologischen Bedingungen die Aufnahmekapazität einer Lagerstätte zu beeinflussen. Zu diesen Möglichkeiten gehört die Veränderung der Abbrandrate, der Abklingzeit im Zwischenlager oder des Lagerdesigns zur besseren Ausnutzung des verfügbaren Wirtsgesteins. Eine Entsorgungsstrategie sollte entwickelt werden, ohne dabei die Verfügbarkeit dieser Optionen zu unterstellen, aber für mögliche positive Adaptionen offen gehalten werden. Dies gilt in gleicher Weise für mögliche Fortschritte in Forschung und Entwicklung wie etwa die Abtrennung und Transmutation, die die an ein Endlager zu stellenden Anforderung in Bezug auf Sicherheit und Gefahrenabwehr erheblich reduzieren könnten.

(17) Das Rahmenprogramm sollte hinsichtlich der Standortauswahl und Errichtung eines Endlagers darauf ausgerichtet sein, die Lösung so schnell wie vernünftigerweise erreichbar herbeizuführen.

Das empfohlene Programm für die Standortauswahl und die Errichtung einer Endlagerstätte sollte darauf ausgerichtet sein, die Lösung so schnell herbeizuführen, wie dies unter Einbeziehung der relevanten technischen, rechtlichen und planerischen Gesichtspunkte und der gesellschaftlichen und politischen Belange vernünftigerweise vertretbar ist.

Dabei sollten auch neue wissenschaftliche Entwicklungen einbezogen werden, die die Anforderungen an ein Endlager ändern könnten. Das Programm sollte für unvorhergesehene Ereignisse offen sein und die Möglichkeit einschließen, dass sich Gorleben als ungeeignet erweisen könnte.

Es sollten genügend Zeitreserven für gerichtliche Entscheidungen, für Partizipation und Kommunikation eingebaut werden. Zeiträume für jeden Abschnitt des Partizipationsverfahrens sollten vorab mit den Beteiligten vereinbart werden, um eine Strategie der endlosen Verzögerung von Entscheidungen durch einzelne Akteure zu erschweren.

Theoretisch besteht immer die Möglichkeit, dass sich ein anderer Standort als (noch) besser erweist. Aus praktischen Gründen jedoch ist eine unbegrenzte Fortsetzung der Standort-Erkundung nicht möglich. Daher kann eine Optimierung der Standortauswahl kaum nach absoluten Maßstäben angestrebt werden, sondern nur im Rahmen einer Planungsweisung – wie auch in seinem klassischen Anwendungsgebiet (dem Strahlenschutz) das Minimierungsgebot nicht absolut gilt.

2.4 Auswahlverfahren, Kriterien

- (18) Die in der Diskussion in Deutschland zu Tage tretenden Konflikte erfordern ein auf Legitimation und Konfliktminderung ausgerichtetes Entscheidungsverfahren, das auch die Berücksichtigung tieferliegender Konflikte ermöglicht.

Die Wahl von Gorleben als Endlagerstandort ist in der öffentlichen Diskussion höchst umstritten. Zum einen wird vorgetragen, dass diese Vorausswahl überwiegend nach politischen und nicht nach wissenschaftlich-technischen Kriterien vorgenommen sei, zum anderen wird kritisiert, dass eine Eignungsprüfung bei nur einem Standort keine verlässliche Methode darstelle, um einen geeigneten Standort zu finden. Eine Entscheidungsfindung ist höchst konfliktbeladen: eine Eingrenzung der Eignungsprüfung auf Gorleben nährt den Verdacht, dass nicht objektiv nach einem relativ besten Standort gesucht wird, eine Ausdehnung auf andere Standorte wird aller Voraussicht nach dort ebenso weitreichende Proteste auslösen. Dieses Dilemma erscheint nicht kurzfristig auflösbar und erfordert umso dringender ein auf Legitimation und Konfliktminderung ausgerichtetes Entscheidungsverfahren. Entscheidungsprozesse müssen darüber hinaus die tieferliegenden Konflikte um Modernisierung und Lebensstile, energiepolitische Weichenstellung und Fragen der Legitimation für die kollektive Entscheidungsfindung mit berücksichtigen.

- (19) Bei den Entscheidungen müssen höchstmögliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit sowie Chancen der direkten Beteiligung der Öffentlichkeit ohne Einschränkung der Verantwortlichkeit des Staates gewährleistet werden.

Im Rahmen der Entscheidungsfindung und des Auswahlverfahrens ist vor allem auf eine höchstmögliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit der einzelnen Verfahrensschritte und die konstruktive Beteiligung der Zivilgesellschaft zu achten, ohne dabei die klare Verantwortlichkeit der durch

das Grundgesetz und Atomgesetz legitimierten Institutionen im Rahmen des repräsentativen und föderalen Systems der Bundesrepublik Deutschland einzuschränken. Die Einbindung strukturierter Formen der Beteiligung gesellschaftlicher Gruppen und der lokalen Bevölkerung an der Willensbildung und Entscheidungsvorbereitung steht nicht im Widerspruch zu der repräsentativen Demokratie, sondern kann sie ergänzen und bei geeigneten Vorgehensweisen bereichern.

(20) Es sollten verschiedene Optionen für das Verfahren der Standortsuche diskutiert und gegeneinander abgewogen werden.

Prinzipiell kommen folgende Möglichkeiten der Problemlösung, insbesondere der Standortbestimmung in Frage:

- (a) Auslotung einer gemeinsamen europäischen Lösung,
- (b) Fortsetzung der untertägigen Untersuchungen und Überprüfung des Standortes Gorleben nach anerkannten Zielvorgaben für die Eignungsfähigkeit,
- (c) wie (b), aber parallel dazu sofortige Ermittlung und Erkundung weiterer Standorte und
- (d) Aufnahme eines völlig neuen Suchverfahrens, um mehrere möglicherweise geeignete Standorte (unter Einschluss oder Ausschluss von Gorleben) parallel zu erkunden und relativ zueinander zu bewerten (vgl. ergänzend die Darstellungen im Abschnitt A 2.8).

(21) Eine gemeinsame europäische Lösung ist nur dann glaubhaft, wenn Deutschland auch einen möglichen Standort einbringt.

Eine gemeinsame europäische Lösung ist nur dann glaubhaft und fair zu vertreten, wenn Deutschland auch eine Standortoption im eigenen Land einbringt. Insofern würde auch diese Lösung eine Standortwahl in Deutschland voraussetzen. Damit reduziert sich die Zahl der zu erwägenden Möglichkeiten auf drei.

(22) Es wäre nicht sinnvoll, auf der Standorterkundung in Gorleben ohne Prüfung von Alternativen zu bestehen.

Nachdem die deutsche Bundesregierung bereits entschieden hat, die unterirdische Erkundung von Gorleben ohne die Erwägung alternativer Standorte wieder aufzunehmen, scheinen Vorschläge zur Initiierung einer neuen Suche politisch fragwürdig. Gleichwohl erscheint es mit Blick auf die verbreiteten Akzeptanzmängel sowie dem Anspruch, einen für Deutschland besonders geeigneten Standort zu finden, sinnvoll, weitere Standortoptionen mit in die Standortsuche zu integrieren. Zudem haben die Überlegungen zur räumlichen und regionalen Entwicklung, die die Auswahl des Standortes Gorleben Ende der 1970er Jahre bestimmt haben, inzwischen viel von ihrer Überzeugungskraft verloren. Damit stellt sich die Frage einer

raumplanerisch angemessenen und umweltgerechten Lösung erneut. Daher sollte die Wahl zwischen den drei genannten Möglichkeiten der Problemlösung (b), (c) und (d) neu eröffnet und unter breiter Beteiligung der Öffentlichkeit erörtert werden. Erst im Anschluss an eine organisierte nationale Debatte, die auch um Formen der Internet-Partizipation ergänzt werden könnte, sollte die Frage, welche der Optionen zu ergreifen ist, durch die Bundesregierung neu entschieden werden.

(23) Die Projektgruppe empfiehlt einen Hybridansatz, der die Weitererkundung des Standorts Gorleben bei gleichzeitiger Untersuchung alternativer Standorte von Übertage vorsieht.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt einen Hybridansatz („Gorleben plus“), der folgende Komponenten einschließt:

- (a) Weitererkundung des Standorts Gorleben, Entwicklung und Bewertung von Entsorgungsstrategien für diesen Standort mit dem Ziel abzuklären, ob er sich als geeignet erweist und den Sicherheitsanforderungen und planerischen Erfordernissen genügt.
- (b) gleichzeitig: Untersuchung alternativer Standorte als zusätzliche Entsorgungs-Optionen und Beginn von Erkundungen dieser Standorte von Übertage, insbesondere unter Aufnahme der Vorschläge des „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ (AKEnd) und der durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als aussichtsreich eingestuften Regionen und Standorte.
- (c) ein präziser bestimmter Zeitpunkt für die prinzipielle Entscheidung, ob und ggf. wie die Erkundung am Standort Gorleben und/oder an den alternativen Standorten fortgesetzt werden soll; die Entscheidung sollte auf eine Weise vorbereitet und getroffen werden, die sie möglichst robust macht gegen politische Wechsel.
- (d) ein Konzept, nach dem alle zuvor ermittelten Ergebnisse und Argumente als auch die wissenschaftlich-technischen Rahmenbedingungen an alle Akteure kommuniziert werden können, damit sie sich angemessen an der Debatte und – soweit wie es die rechtlichen Bestimmungen vorsehen – am Entscheidungsprozess beteiligen können.

(24) Die Empfehlung, den Standort Gorleben zu erkunden und zusätzliche Standort-Optionen zu bestimmen, zielt auf die Maximierung der Chancen, in den nächsten Jahrzehnten über ein Endlager verfügen zu können.

Die Empfehlung, sowohl den Standort Gorleben weiter zu erkunden als auch zusätzliche Entsorgungs-Optionen zu bestimmen, zielt vor allem auf die Maximierung der Chancen, in den nächsten Jahrzehnten über ein Endlager für radioaktive Abfälle verfügen zu können. Gorleben nicht zu berücksichtigen würde zum Verlust einer möglichen Standortoption führen, ohne dass gewährleistet ist, dass innerhalb einer angemessenen Zeit ein al-

ternativer Standort gefunden werden kann. Auf alternative Standortoptionen bei der laufenden Standortsuche zu verzichten, würde zu einem erheblichen Zeitverlust (in der Größenordnung einiger Jahrzehnte) führen, falls Gorleben in einem späten Stadium des Erkundungsprojekts scheitert. Die zeitliche Staffelung der Erkundung ist sicherheitstechnisch durchaus vertretbar, wenn die Zwischenlager entsprechend nachgerüstet werden (vgl. ergänzend die Darstellungen im Abschnitt A 2.8).

- (25) Die parallele Suche spart im Falle des Scheiterns von Gorleben nicht nur Zeit ein, sondern erhöht auch die Glaubwürdigkeit des Auswahlverfahrens.**

Die parallele Suche erhöht auch die Glaubwürdigkeit des Prüfverfahrens insgesamt. Gleichwohl ist einzuräumen, dass – insbesondere auf der lokalen und regionalen Ebene – auch dann die öffentliche Akzeptanz noch zurücksteht hinter derjenigen, die für ein vollständig offenes Suchverfahren zu erwarten ist. Dennoch stellt „Gorleben plus“ eine Lösung in Aussicht, die zeitnah und ressourcenschonend ist, die für die Meinung der Öffentlichkeit und das Engagement der Stakeholder sensibel ist.

- (26) Die Festlegung der Kriterien für die Standorte sollte in einem transparenten Verfahren unter Einbeziehung eines internationalen „Peer Reviews“ vorgenommen werden.**

Die Festlegung der Kriterien, um die Eignung oder Nicht-Eignung der Standorte festzustellen, wird in einem transparenten Verfahren unter Einbeziehung eines internationalen „Peer Reviews“ vorgenommen. Dabei werden in Analogie zum Sachplan in dem Schweizer Verfahren zur Bestimmung eines Standortes sicherheitstechnische, geologische und raumplanerische Kriterien parallel entwickelt. Kriterien und Schwellenwerte müssen so definiert werden, dass sie nicht nur auf Gorleben, sondern auf alle Standorte anwendbar sind.

- (27) Es sollte festgelegt werden, dass Erkundungen untertage an einem anderen Standort unternommen werden, wenn die oberirdischen Erkundungen erwarten lassen, dass dieser Standort die Auswahlkriterien eindeutig besser als Gorleben erfüllen könnte.**

Aus pragmatischen Gründen sollte das Schwergewicht darauf gelegt werden, einen Standort zu finden, der nach entwickelten Kriterien geeignet ist, hochradioaktiven Abfall sicher einzulagern. Optimierungsgesichtspunkte sind insbesondere bei der Prüfung der Reservestandorte zur Geltung zu bringen. Es sollten Vorkehrungen getroffen werden, dass unterirdische Erkundungen dann an einem der anderen Standorte unternommen werden, wenn und falls die Erkundung von Übertage zu dem Ergebnis kommt, dass dieser alternative Standort (mit Salz oder einem anderen Wirtsgestein) die Auswahlkriterien nachweislich besser erfüllt als Gorleben.

- (28) Programme für Forschung und Entwicklung sollten bedarfsgerecht gestaltet und regelmäßig überprüft werden, aber hinreichend breit und flexibel angelegt sein, damit etwaige Revisionen von Entscheidungen nicht ausgeschlossen werden.**

Programme für Forschung und Entwicklung sollten in Abstimmung mit den aus dem Ablaufplan des Rahmenprogramms ableitbaren Erfordernissen gestaltet und regelmäßig überprüft werden. Sie sollten darauf ausgerichtet sein, die durch Beschluss bestimmten Programmoptionen zu unterstützen, zugleich aber hinreichend breit angelegt und flexibel, um einer Revision getroffener Entscheidungen nicht im Wege zu stehen. Insbesondere sollte, um alle in Frage kommenden zusätzlichen Optionen offen zu halten, auch die laufende Erforschung der Einlagerung in verfestigtem Ton fortgesetzt werden.

2.5 *Transparenz, Risikokommunikation, Partizipation*

- (29) Eine umfassende Information der Öffentlichkeit ist zu gewährleisten. Zur Unterstützung der erforderlichen Transparenz sollte ein Informationszentrum eingerichtet werden.**

Für einen erfolgreichen Abschluss des Verfahrens ist Transparenz von besonderer Bedeutung. Eine umfassende Information und Kommunikation mit der Öffentlichkeit und allen Betroffenen über die bei der Ausgestaltung des Endlagers zugrunde gelegten Standards für Sicherheit und Gefahrenabwehr sind unerlässlich. Alle Aktivitäten der Entscheidungsfindung sollen durch ein proaktives und auf Dialog basierendes Kommunikationsprogramm begleitet werden. Noch nicht festgelegte Personen erhalten Informationsangebote, die notwendig sind, um sich selbst ein fundiertes Urteil für die Entscheidungsfindung bilden zu können. Insbesondere sollten Informationen über die nachfolgenden Aspekte in einer für Laien verständlichen Darstellungsform – auch unterstützt durch ein einzurichtendes Informationszentrum (Kommunikationszentrum) – verfügbar gemacht werden:

- die geologischen Voraussetzungen des Standortes und ihr Zusammenwirken mit der technischen Auslegung des Lagers sowie der verschiedenen Barrieren;
- die anstehenden Verfahrensschritte und ihre zeitliche Abfolge;
- die Referenzdosiswerte (Richt- und Grenzwerte) für die verschiedenen Phasen der Lagerstätte sowie ihre Stellung und Begründung im Gesamtsystem des Strahlenschutzes;
- Modelle und Methoden für die Abschätzung von Strahlendosen für die ausgewählten Freisetzungsszenarien und deren Ergebnisse;
- Forschung und Entwicklung, die in Deutschland und im Ausland unternommen werden, Entsorgungsoptionen, die international diskutiert sowie Strategien, die in anderen Ländern ergriffen wurden und werden.

- (30) Bei der Standortauswahl sollte eine wirksame Partizipation stattfinden, ohne die letztgültige Verantwortung des Parlaments und der Exekutive in Frage zu stellen.**

Das Standortauswahl-Verfahren sollte für eine wirksame Partizipation offen sein, ohne die letztgültige Verantwortung der Parlamente und der Exekutive in Frage zu stellen. Um den Prozess nicht durch Überkomplexität zu lähmen, sollten übermäßig schwerfällige Verfahrensordnungen vermieden werden, etwa ein auf verschiedene Ebenen gestaffelter Diskurs und eine Vielzahl formeller Institutionen.

- (31) Über Fragen von nationaler Bedeutung sollte eine organisierte öffentliche Debatte vorgesehen werden.**

Auf nationaler Ebene sollte, etwa durch die Entsorgungs- und die Strahlenschutzkommission oder das Bundesamt für Strahlenschutz, eine öffentliche Debatte über die Fragen von nationaler Bedeutung initiiert und organisiert werden, ergänzt um neue Formen der Partizipation. Gegenstände der Debatte sollten v.a. die Entscheidung über Optionen des Auswahlverfahrens, die Kriterien für die Standortauswahl, die Auswahl für weitere (untertägige) Charakterisierung des Standortes sowie Fragen der Rückholbarkeit sein.

- (32) Eine weitergehende Mitwirkung von lokalen Vertretern der Zivilgesellschaft ist erst dann sinnvoll, wenn Fragen von lokaler Bedeutung zur Diskussion stehen.**

Eine weitergehende Mitwirkung von lokalen Gruppen der Zivilgesellschaft ist erst dann sinnvoll, wenn Fragen von lokaler Bedeutung in Frage stehen. Dies gilt für die fortlaufende Bewertung der Untersuchungsergebnisse für Gorleben, für die Bewertung der Ergebnisse der Erkundung alternativer Standorte von Übertage und für die Entscheidung, ob Gorleben als Standort geeignet ist oder nicht. Im Falle einer Entscheidung für Gorleben sollte auch bei der lokalen und regionalen Umsetzung (hinsichtlich des „wie“) eine Bürgerbeteiligung stattfinden. Die Vorschläge, die der AKEnd dazu gemacht hat, könnten hier aufgegriffen werden.

- (33) Bei der parallel zur Erkundung des Standortes Gorleben erfolgenden Standortauswahl sollten freiwillige alternative Kandidaten, die geeignet erscheinen, vorrangig betrachtet werden.**

In Analogie zu dem in Finnland und Schweden gewählten Verfahren wäre die Einbeziehung potentieller freiwillig optierender Standortgemeinden oder regionen wünschenswert. Daher sollten im Standortauswahlverfahren, das parallel zur weiteren Erkundung des Standorts Gorleben durchgeführt werden sollte, freiwillig optierende alternative Kandidaten, sofern sie die für den jeweiligen Stand des Verfahrens anzulegenden Kriterien erfüllen, vorrangig betrachtet werden.

2.6 Institutionen im Verfahren, Expertengruppen

- (34) Es sollte ein Gremium von Experten mit ausgewiesener wissenschaftlicher bzw. technischer Kompetenz gebildet werden.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt, eine Expertengruppe einzuberufen, deren Aufgabe es v. a. ist, die Kriterien für die Eignungsprüfung aufzustellen und am Ende der Erkundung eine Empfehlung auszusprechen, ob die Kriterien erfüllt sind oder nicht. Da auf diesem Gremium ein hohes Maß an Verantwortung ruht und es in einer so konfliktreichen Situation auf hohe Legitimation angewiesen sein wird, ist auf ausgewiesene wissenschaftliche bzw. technische Kompetenz, Unabhängigkeit und Ausgewogenheit zu achten. Um dies zu gewährleisten, empfiehlt die Arbeitsgruppe:

- Das Gremium soll bei einer unabhängigen Institution, z. B. bei der Nationalen Akademie der Wissenschaften, angesiedelt sein.
- Mitglieder können von den einschlägigen Wissenschaftsorganisationen, von zivilgesellschaftlichen Gruppen und den Betreibern vorgeschlagen werden.
- Die Sitzungen des Gremiums sind öffentlich.
- Das Gremium erhält das Recht und die notwendigen Ressourcen, Gutachten einzuholen sowie Hearings abzuhalten, wenn es dies für notwendig ansieht.
- Die Empfehlungen des Gremiums sind nicht bindend. Allerdings müsste der zuständige Entscheidungsträger schon stichhaltige und öffentlich nachvollziehbare Argumente vorweisen können, um von dem Votum des Gremiums abzuweichen.

- (35) Auf lokaler Ebene sollte für jeden zur Wahl stehenden Standortkandidaten ein Dialogforum als institutionelle Anlaufstelle für die regionale Bevölkerung eingerichtet werden.

Auf lokaler Ebene sollte als eine ergänzende Institution der öffentlichen Partizipation für jeden noch zur Wahl stehenden Standortkandidaten (also auch für Gorleben) ein Dialogforum eingerichtet werden. Die lokalen Dialogforen sollen als institutionelle Anlaufstelle die wirksame Beteiligung der regionalen Bevölkerung erleichtern und in den verschiedenen Phasen des Auswahlverfahrens den Zugang zu unabhängigem Sachstandswissen ermöglichen. Hierzu könnten die Foren öffentliche Debatten anregen, öffentliche Diskussionsrunden organisieren und den Zugang zu Expertenpools ermöglichen.

2.7 Behördenorganisation

- (36) Die Verteilung der Zuständigkeiten der mit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle befassten Behörden und sonstigen Organisationen sollte verbessert werden.

Eine verbesserte Verteilung der Zuständigkeiten zwischen allen damit befassten Organisationen würde die Chancen zur Durchführung des

vorgeschlagenen Programms zur Entsorgung radioaktiver Abfälle erheblich erhöhen. Dies würde sowohl dem Gemeinsamen Abkommen als auch der vorgeschlagenen EU-Richtlinie zur Entsorgung radioaktiver Abfälle entsprechen. Eine klare und deutlich wahrnehmbare Trennung und die Einhaltung des erforderlichen organisatorischen Abstandes zwischen Antragsteller und Regulierungsbehörden dürften zu einer Verbesserung der Akzeptanz sowie zu einem höheren Vertrauen in das Verfahren und die Verfahrensbeteiligten beitragen. Die unterstützende Forschung sollte in einer Weise organisiert sein, die die Wirksamkeit dieser veränderten Strukturen maximal fördert. In dieser Hinsicht dürfte sich die gegenwärtig etablierte Trennung zwischen standortspezifischer Forschung und Grundlagenforschung als unangemessen erweisen.

- (37) Als Teil der Reform des institutionellen Rahmens sollte das Bundesamt für Strahlenschutz in eine unabhängige Regulierungsbehörde umgewandelt werden.**

Ein zentrales Anliegen der angeregten Reformen des institutionellen Rahmens für die Regulierung und die Durchführung der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle ist die Überführung des Bundesamtes für Strahlenschutz in eine tatsächlich unabhängige Regulierungsbehörde, die zentrale Aufgaben im Bereich der Entsorgung radioaktiver Abfälle, insbesondere für die Regulierung, Standortwahl und Aufsicht übernehmen kann. Zu diesem Zweck sollte die gegenwärtige Vermischung ihrer verschiedenen Aufgaben in der Regulierung und Durchführung zugunsten einer klaren Trennung ihrer Funktionen aufgegeben werden.

- (38) Der Betrieb des Endlagers könnte einer neuen Bundesoberbehörde, einer Körperschaft des öffentlichen Rechts oder einer privatrechtlichen Körperschaft, die mit entsprechenden hoheitlichen Befugnissen ausgestattet ist, übertragen werden.**

Die Verwaltung des Endlagers könnte einer neuen Agentur auf Bundesebene, oder, in dem vom Atomgesetz vorgesehenen Rahmen, einer Körperschaft des öffentlichen Rechts oder einer privatrechtlichen Körperschaft, die mit entsprechenden hoheitlichen Befugnissen ausgestattet ist, übertragen werden. In einer solchen Körperschaft könnten die Unternehmen, die direkt oder indirekt (über Tochtergesellschaften oder Joint Ventures) die Kernkraftwerke in Deutschland betreiben, und – im Interesse des öffentlichen Vertrauens – die Bundesregierung gemeinsam Anteilseigner werden. Die Anteilsmehrheit sollte dabei in jedem Falle von der öffentlichen Hand gehalten werden.

2.8 Entscheidungs-Diagramme

2.8.1 Vorbemerkungen

Die nachfolgenden Entscheidungsdiagramme sollen die Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines Entsorgungsprogramms (vgl. die Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Abschnitt A.2.3) graphisch illustrieren. Die Diagramme sollen eine Übersicht geben (i) über Entscheidungen, die in der Vergangenheit schon getroffen wurden und über deren Beibehaltung oder Revision heute nachgedacht werden darf (kann), (ii) über die Optionen, die für künftige Entscheidungen offen stehen. Die in die Diagramme eingetragenen zeitlichen Angaben beruhen auf den in Abschnitt B.1.5 ausführlich dargelegten und begründeten Abschätzungen.

Die Entscheidungsdiagramme sind abgeleitet worden von Überlegungen, die im Rahmen des EU COMPAS-Projekts (Dutton et al. 2004) entwickelt wurden. Sie beziehen jedoch Aspekte mit ein, die für die Situation in Deutschland spezifisch sind. Obwohl die Logik der COMPAS-Studie grundsätzlich übernommen wurde, wurde eine wesentliche Abweichung hinsichtlich der Einkapselung eingeführt. Die Einkapselung der Abfälle kann nur dann auf angemessene Weise erfolgen, wenn die Entsorgungs-Lösung bereits bekannt ist.

Die Entscheidungs-Diagramme sind auf die Behandlung abgebrannter Kernbrennstoffe zugeschnitten. Dabei wurden folgende Annahmen bezüglich des Deutschen Entsorgungsprogramms vorausgesetzt:

- Es werden keine weiteren Kernkraftwerke in Deutschland gebaut. Wie in Teil B dieses Buches dargelegt, werden die Laufzeiten der bestehenden Anlagen die Voraussetzungen für die anstehenden Entscheidungen nicht wesentlich verändern.
- Die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle in tiefengeologischen Schichten ist prinzipiell technisch machbar.

Entscheidungen, die bereits in der Vergangenheit getroffen wurden und/oder durch technische Erfordernisse determiniert sind, sind durch dunkelgraue Flächen gekennzeichnet. Fette Linien zeigen die in der vorliegenden Studie gegebenen Empfehlungen an – welche früher schon getroffenen Entscheidungen besser nicht revidiert und welche künftigen Entscheidungen getroffen werden sollten, wenn das Ziel darin besteht, die Chancen für ein Endlager in den nächsten Jahrzehnten zu maximieren.

Einige der im Diagramm I (Fig. A.1) dargestellten Entscheidungen werden nachfolgend eingehender erläutert. Die Nummern beziehen sich dabei auf diejenigen in den Entscheidungsknoten des Diagramms.

- ⟨1⟩ Gemäß dem Atomgesetz finden seit 2005 keine weiteren Transporte zu Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich und in Großbritannien statt. Entsprechend ist die Entscheidung zugunsten von „keine Wieder-

- aufarbeitung“ als bereits in der Vergangenheit getroffen gekennzeichnet. Allerdings sind Abfälle aus früherer Wiederaufarbeitung vorhanden und ebenfalls zu entsorgen.
- (2) Die Wiederaufarbeitungs-Anlage in Wackersdorf hat den Betrieb nie aufgenommen. Vor 2005 wurden abgebrannte Brennstoffe (SNF) in französische und britische Wiederaufarbeitungs-Anlagen geliefert. Vor 1989 wurden alle SNF aus Kernkraftwerken der DDR in die Sowjet-Union verbracht.
 - (3) Während alle Abfälle, die aus der Wiederaufarbeitung in französischen oder britischen Anlagen nach Deutschland zurückkommen, werden keine Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der SNF, die in der DDR angefallen sind, nach Deutschland zurückkehren. Verbleibende Brennstoffe aus ostdeutschen Beständen werden im Zwischenlager Nord nahe Lubmin/Greifswald gelagert. Internationale Verträge sehen vor, dass Brennstäbe aus Forschungsreaktoren der DDR an Russland übergeben werden.
 - (4) Gegenwärtig werden SNF in Deutschland lokal und nahe den Reaktoranlagen zwischengelagert. In der Vergangenheit wurden allerdings schon einige SNF in die zentralen Zwischenlager von Ahaus und Gorleben verbracht und dort eingelagert. In Gorleben werden auch die verbleibenden hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gelagert und es ist vorgesehen, die verbleibenden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ebenfalls dort zu sammeln. Alle Zwischenlager haben eine Genehmigung für vierzig Jahre, beginnend mit dem Aufstellen des ersten Behälters. Diese Genehmigungen sind an die Laufzeiten für die Castor-Behälter geknüpft. Eine Verlängerung der Betriebszeiten für Zwischenlager würde daher einer neuen Genehmigung bedürfen.
 - (5) Hier wird lediglich unterschieden zwischen Entsorgungs-Optionen, die ihrer Art nach prinzipiell keine Rückholung der Abfälle erlauben und solchen, die einer späteren Rückholung der Abfälle prinzipiell nicht entgegenstehen (unabhängig davon, ob in der konkreten Umsetzung dann die Rückholbarkeit vorgesehen wird oder nicht). Das Entscheidungsdiagramm sieht lediglich die *Option* der Rückholbarkeit vor; Entscheidungen, die tatsächlich eine Rückholbarkeit vorsehen, werden dagegen nicht betrachtet.
 - (6) De facto ist in Deutschland eine Entscheidung zugunsten einer Entsorgung in tiefen geologischen Anlagen getroffen. Dies steht im Einklang mit den hier gegebenen Empfehlungen.
 - (7) Zu den Notwendigkeiten, die mit einer internationalen Lösung einhergehen, vgl. Schlussfolgerungen/Empfehlungen § 21: Eine gemeinsame europäische Lösung ist nur dann glaubhaft, wenn Deutschland auch einen möglichen Standort einbringt.
 - (8) Die Entscheidung für ein Wirtsgestein ist zu treffen mit Blick auf eine Reihe von Rahmenbedingungen und Kriterien, einschließlich der Ver-

füßbarkeit in geologisch stabilen Regionen und Sicherheits-Analysen, die auf dem gesamten Entsorgungskonzept (einschließend technischer Komponenten) basieren. Besonders hinzuweisen ist auf eine wechselseitige Abhängigkeit von und mit Entscheidung über die Rückholbarkeit. Die fett gezeichnete Pfeillinie deutet die Präferenz für Salz als Wirtsgestein in Deutschland an, die sich nicht nur in den Erkundungen in Gorleben, sondern auch in zahlreichen anderen Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten manifestiert.

Der Vorschlag des AKEnd zielt auf ein Standortauswahl-Verfahren ohne Vorentscheidung für ein Wirtsgestein. Gleichwohl ist der Begriff eines „einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“, wie er zunächst durch das AKEnd geprägt wurde und der nun Eingang gefunden hat in die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMU (2010a), geht mit einer Vorauswahl für Salz und Ton als Wirtsgestein einher, da es als sehr unwahrscheinlich gelten muss, dass kristalline Formationen in Deutschland den Anforderungen an einen solchen „einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ entsprechen können.

- (9) Die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMU (2010a) fordern, dass während der gesamten Betriebsphase die Rückholbarkeit gewährleistet und die „Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren“ gegeben bleibt (§ 8.6). Es ist damit zu rechnen, dass zukünftige Diskussionen über die Entsorgung radioaktiver Abfälle diese Frage erneut eröffnen werden. Hinzuzuweisen ist in diesem Zusammenhang auf die Interdependenz dieser Aspekte mit der Wahl des Wirtsgesteins.
- (10) Entscheidungen, die in näherer Zukunft anstehen. Die fetten Pfeillinien deuten die durch mehrere Gründe bestimmte Präferenz der Arbeitsgruppe für einen Hybridansatz an („Gorleben plus“, vgl. die Schlussfolgerungen und Empfehlungen, §§ 23, 24, 25). Die nachfolgende Übersicht des Diagramms soll deutlich machen, wann und in Abhängigkeit von welchen Entwicklungen wesentliche Prozessziele erreicht werden können. Die erwartbare zeitliche Entwicklung ist auch durch die vertikalen Abstände der Figuren angedeutet.

Diagramm II (Fig. A.2) gibt einen ausführlicheren Überblick über die Phasen und die möglichen Resultate des Standortauswahl-Verfahrens im Rahmen des von der Arbeitsgruppe empfohlenen Hybridansatzes „Gorleben plus“.

2.8.2 Entscheidungsdiagramm I

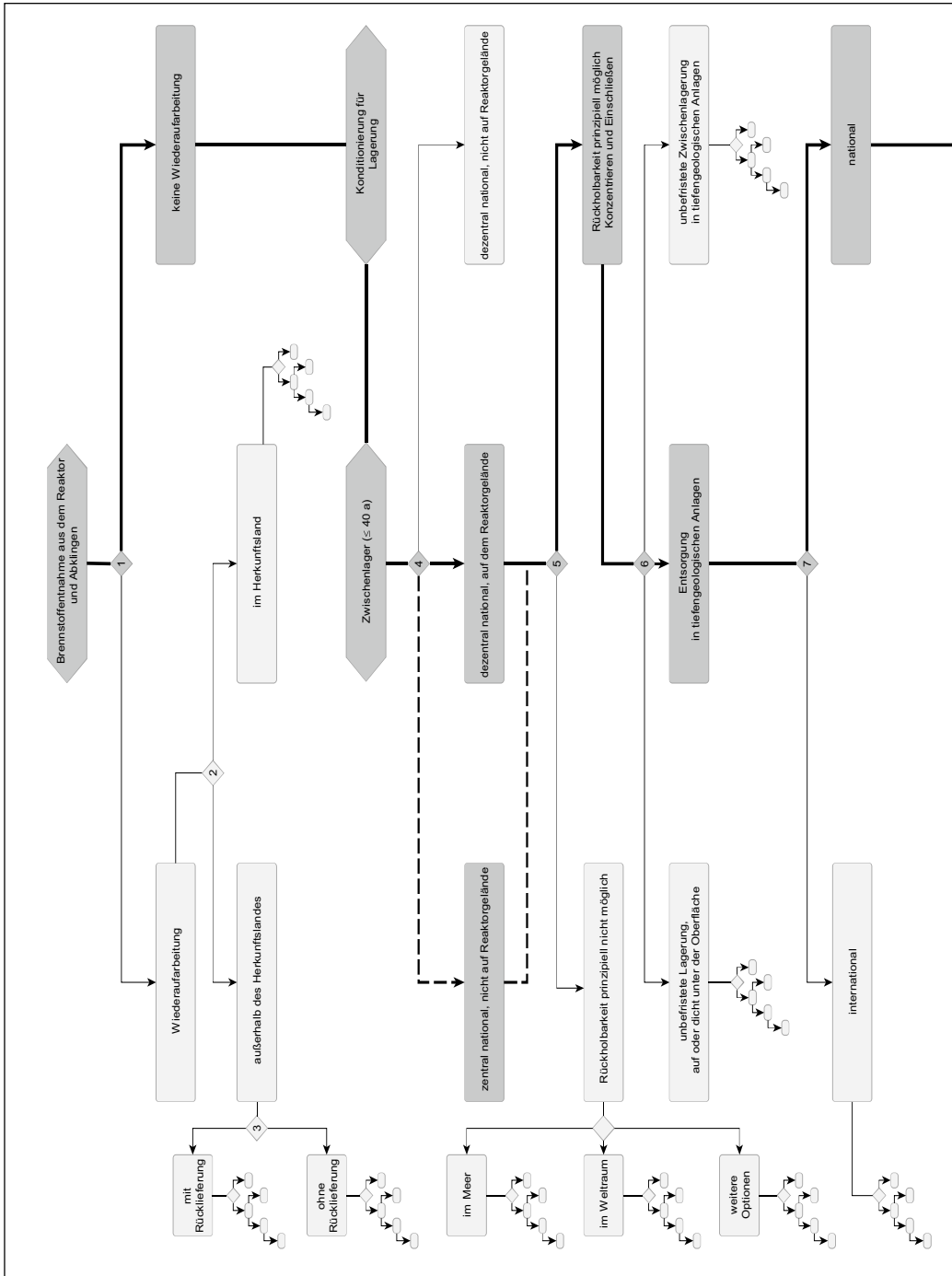


Abb. A.1: Entscheidungsdiagramm I: Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines Entsorgungsprogramms (vgl. die Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Abschnitt A.2.3)

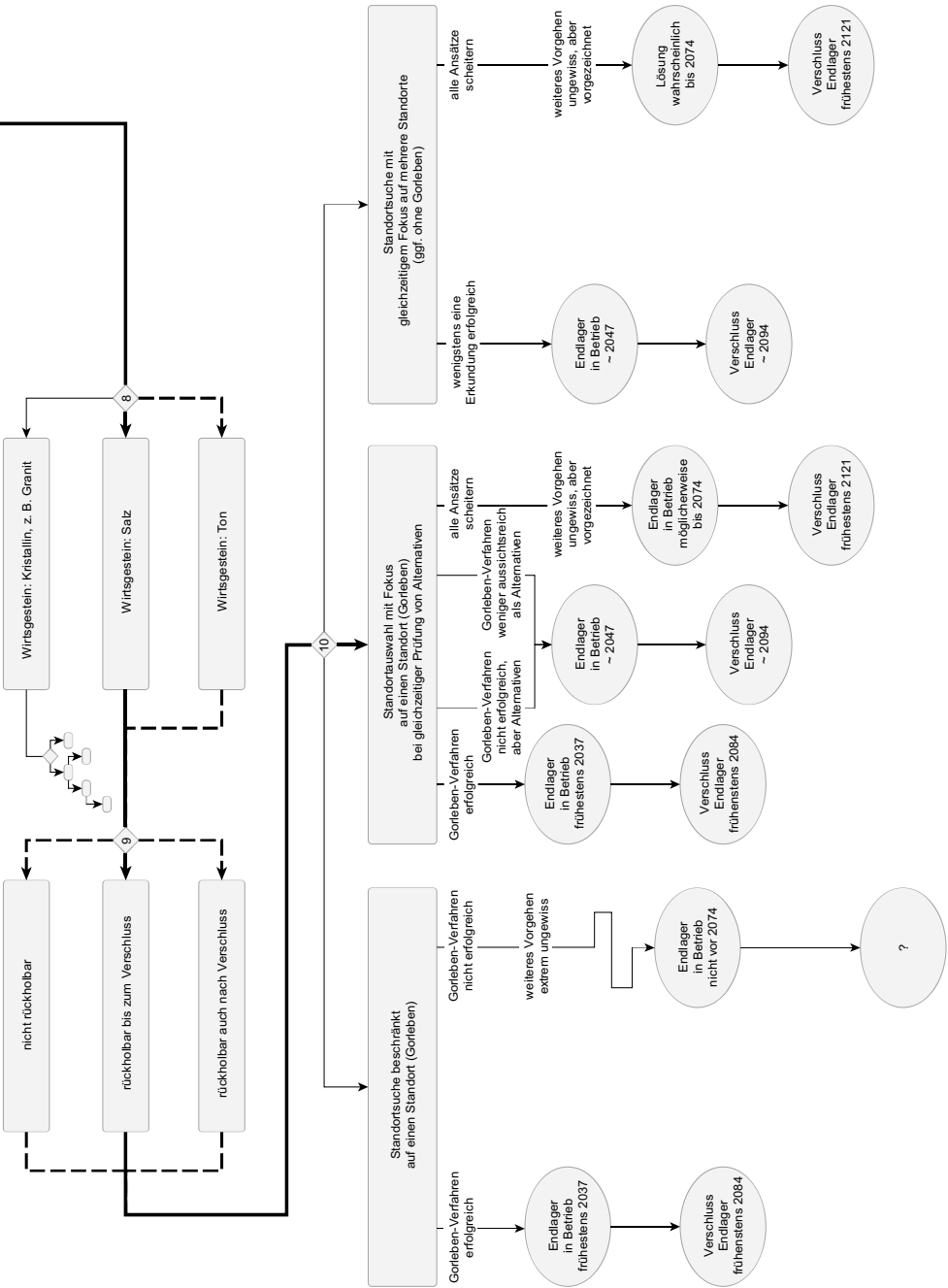


Table of Contents

Einleitung	1
A Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	9
1 Zusammenfassung	11
1.1 Technische Aspekte der dauerhaften Entsorgung radioaktiver Abfälle.....	11
1.2 Strahlenrisiko und Strahlenschutz	17
1.3 Entsorgung hochradioaktiver Abfälle unter dem Aspekt der Langzeitverantwortung	21
1.4 Rechtsfragen	24
1.5 Leitlinien für eine sozial verträgliche und gerechte Standortbestimmung	28
2 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	34
2.1 Ethische Grundlagen	34
2.2 Sicherheitsanforderungen und -ziele	36
2.3 Entsorgungsprogramm und zeitlicher Ablauf	38
2.4 Auswahlverfahren, Kriterien	41
2.5 Transparenz, Risikokommunikation, Partizipation	45
2.6 Institutionen im Verfahren, Expertengruppen.....	47
2.7 Behördenorganisation.....	47
2.8 Entscheidungs-Diagramme.....	49
2.8.1 Vorbemerkungen.....	49
2.8.2 Entscheidungsdiagramm I.....	52
2.8.3 Entscheidungsdiagramm II	54

Introduction	57
A Executive summary, conclusions and recommendations	65
1 Executive summary	67
1.1 Technical issues of long-term radioactive waste management	67
1.2 Radiation risk and radiological protection	72
1.3 Management of high level waste with reference to long-term responsibility	75
1.4 Legal questions of managing high level radioactive waste	78
1.5 Guidelines for a socially acceptable and fair site selection	82
2 Conclusions and recommendations	87
2.1 Ethical framework	87
2.2 Safety requirements and goals	89
2.3 Waste management programme and timescale	91
2.4 Selection process, criteria	93
2.5 Transparency, communication of risks, participation	97
2.6 Institutions in the procedure, expert groups	99
2.7 Administrative structure	99
2.8 Decision-diagrammes	100
2.8.1 Preliminary remarks	100
2.8.2 Decision diagramme I	104
2.8.3 Decision diagramme II	106
B Technical and normative foundations	109
1 Waste management strategies and disposal design	111
1.1 Background, basic approach	111
1.2 Fuel cycle options and influence on basic aspects of radioactive waste management	112
1.2.1 Classification of radioactive waste	112
1.2.2 Current options for irradiated fuel management	117
1.2.3 Advanced fuel cycles	122
1.2.4 Ensuring subcriticality	126
1.3 Potential radioactive waste management strategies and related technologies	128
1.3.1 Steps and building blocks	128
1.3.2 Reference case: direct disposal of spent nuclear fuel	132
1.3.3 Other cycles for the management of spent nuclear fuel and high level waste	144

1.3.4	Strategic decisions on the “end point” of radioactive waste management	150
1.3.5	Safety and security issues	156
1.3.6	Deep (geologic) disposal: potential host rocks and associated repository concepts	159
1.3.7	Retrievability issues.....	179
1.4	Long term safety assessment and the safety case.....	183
1.4.1	Security against intrusion	183
1.4.2	Challenges to demonstration of long-term safety	184
1.4.3	Safety case concept.....	187
1.5	Timescales and potential roadmap	192
2	Radiation risk and radiological protection.....	200
2.1	Introduction	200
2.2	System of dose quantities in radiological protection	203
2.3	Application of effective dose	209
2.4	Collective dose	211
2.5	Radiotoxicity of safety-relevant radionuclides for waste repositories	212
2.6	Assessment of potential radiation doses from repositories.....	213
2.7	What is a low radiation dose?	220
2.7.1	Microdosimetric considerations	220
2.7.2	Biological considerations.....	222
2.8	Radiation exposures from natural and man-made sources today...222	
2.9	Development of health effects after radiation exposure	227
2.10	Uncertainties and variability in dose and risk assessment.....	228
3	Management of high level radioactive waste with reference to long-term responsibility	234
3.1	Ethics as rational conflict resolution	234
3.1.1	Rational conflict resolution.....	234
3.1.2	Ethics and morality	236
3.1.3	Ethical analysis of conflict	240
3.2	Ethics and morals	246
3.2.1	Long-term obligations as a topic of ethics	246
3.2.2	Long-term obligations and “intergenerational justice”	247
3.2.3	Long-term obligations vs. long-term responsibility.....	249
3.2.4	Long-term obligation – fundamental considerations	251
3.2.5	Long-term obligation in the absence of knowledge	253

3.3	Legitimation and participation	257
3.3.1	Preliminaries.....	257
3.3.2	The tribalisation of science.....	259
3.3.3	The overtaking of the citizens' competence.....	260
3.3.4	The plebiscitarism of the will of the people	262
4	Legal questions of managing high level radioactive waste	265
4.1	Basic legal issues.....	265
4.1.1	The responsibility of the state	265
4.1.2	Principles of radioactive waste management	267
4.1.3	Degree of legalisation of waste management	269
4.1.4	Decision-making levels.....	270
4.2	International conventions and recommendations.....	270
4.2.1	The Joint Convention on the Safety of Spent Nuclear Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management	270
4.2.2	Recommendations of international organisations and other bodies	273
4.3	European regulation.....	276
4.3.1	Euratom Treaty and European Directives	276
4.3.2	Western European Regulator's Association and European Nuclear Safety Regulators Group	280
4.4	Comparative experience	280
4.4.1	General remarks	280
4.4.2	Comparative evaluation	281
4.5	German law	285
4.5.1	Sources of legal regulation	285
4.5.2	Responsibilities	286
4.5.3	Institutional framework	291
4.5.4	Strategies.....	294
4.5.5	Site selection.....	303
4.5.6	Construction and operation	329
4.5.7	Financing.....	334
5	Guidlines for a socially acceptable and fair site selection.....	337
5.1	Introduction	337
5.2	Key issues of the debate	337
5.3	Factors of risk perception	338
5.3.1	Risk as an imminent threat.....	338
5.3.2	Risk as a creeping danger	340

5.4	Consequences of the population's risk perception	341
5.5	Conflict diagnosis: what conflicts dominate the problem of final waste disposal?	342
5.6	A fundamental requirement: effective risk communication.....	344
5.7	Approaches to conflict management	345
5.7.1	Top-down approach	345
5.7.2	Top-down and bottom-up mix (muddling through)	345
5.7.3	Bottom-up approach: discursive site selection.....	346
5.8	A plea for a new beginning with a combined solution.....	346
5.9	Concrete steps towards site selection.....	348
5.10	Conclusions	351
C	<i>Annex and apparatus</i>	353
1	Annex 1: Some fundamental data for the assessment of radiation risk and radiological protection	355
1.1	Introduction and dosimetric quantities	355
1.2	Microdosimetric considerations.....	355
1.2.1	Physical considerations.....	355
1.2.2	Biological considerations.....	358
1.3	Development of health effects after radiation exposure	360
1.3.1	Epidemiological findings and their limits	361
1.3.2	DNA damage and repair	363
1.3.3	Dose modifying phenomena	365
1.3.4	Mechanism of carcinogenesis and association with genomic instability.....	367
2	Annex 2: Legal questions – comparative experience in selected countries	370
2.1	United States.....	370
2.1.1	Sources of regulation	370
2.1.2	Responsibilities	371
2.1.3	Institutional framework	371
2.1.4	Strategies.....	372
2.1.5	Site selection.....	375
2.1.6	Construction and operation	377
2.1.7	Financing.....	378

2.2	France	379
2.2.1	Sources of regulation	379
2.2.2	Responsibilities	380
2.2.3	Institutional framework	380
2.2.4	Strategies.....	382
2.2.5	Site selection	383
2.2.6	Construction and operation	386
2.2.7	Financing.....	387
2.3	United Kingdom	387
2.3.1	Sources of regulation	387
2.3.2	Responsibilities	388
2.3.3	Institutional framework	389
2.3.4	Strategies.....	390
2.3.5	Site selection.....	392
2.3.6	Construction and operation	395
2.3.7	Financing.....	396
2.4	Switzerland	396
2.4.1	Sources of regulation	396
2.4.2	Responsibilities	396
2.4.3	Institutional framework	397
2.4.4	Strategies.....	398
2.4.5	Site selection.....	400
2.4.6	Construction and operation	403
2.4.7	Financing.....	404
2.5	Sweden.....	405
2.5.1	Sources of regulation	405
2.5.2	Responsibilities	406
2.5.3	Institutional framework	408
2.5.4	Strategies.....	408
2.5.5	Site Selection	410
2.5.6	Construction and operation	411
2.5.7	Financing.....	413
2.6	Finland	414
2.6.1	Sources of regulation	414
2.6.2	Responsibilities	415
2.6.3	Institutional framework	416
2.6.4	Strategies.....	416
2.6.5	Site selection.....	418
2.6.6	Construction and operation	419
2.6.7	Financing.....	420

2.7	Japan	420
2.7.1	Sources of regulation	420
2.7.2	Responsibilities	421
2.7.3	Institutional framework	421
2.7.4	Strategies.....	422
2.7.5	Site selection.....	423
2.7.6	Construction and operation	424
2.7.7	Financing.....	425
2.8	Spain.....	425
2.8.1	Sources of regulation	425
2.8.2	Responsibilities.....	426
2.8.3	Institutional arrangements	426
2.8.4	Strategies.....	427
2.8.5	Site selection.....	428
2.8.6	Construction and operation	430
2.8.7	Financing.....	430
3	Abbreviations	431
4	Bibliography	441
	List of Authors.....	461

Figures

Abb. A.1: Entscheidungsdiagramm I: Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines Entsorgungsprogramms	52
Abb. A.2: Diagramm II: Phasen und mögliche Resultate des Standortauswahl-Verfahrens im Rahmen des Ansatzes „Gorleben plus“	54
Fig. A.1: Decision Diagramme I: Boundary conditions concerning the development of the proposed radioactive waste management programme	104
Fig. A.2: Decision Diagramme II: Phases and various possible outcomes of the site selection process under the model “Gorleben plus”	106
Fig. B.1: IAEA waste classification scheme as currently established	115
Fig. B.2: Waste classification used in France	116
Fig. B.3: Fuel cycle options and fractions of fissile material, minor actinides (MA) and fission products	118
Fig. B.4: Development of radiotoxicity inventory with time for various fuel cycle schemes	124
Fig. B.5: Evolution of thermal power with time for various fuel cycle schemes	124
Fig. B.6: High level waste in granite: Calculated annual effective doses	125
Fig. B.7: Schematic illustration of the distribution of radionuclides within a fuel rod	134
Fig. B.8: Evolution of heat generation capacity and radioactivity content of SNF	135
Fig. B.9: The HABOG storage facility in Zeeland	138
Fig. B.10: Schematic of long-term storage variants considered in the Netherlands	156
Fig. B.11: Deep borehole disposal	160
Fig. B.12: Schematic illustration of Concept 1, in-tunnel with long- or short-lived canister	162
Fig. B.13: Schematic illustration of concepts 3 and 4, in-tunnel (axial) with long- and short-lived canister and buffer	163
Fig. B.14: Schematic illustration of concept 6, in-tunnel (axial) with supercontainer	164

Fig. B.15: Schematic illustration of concept 8, caverns with steel MPC (betonite backfill).....	165
Fig. B.16: Schematic illustration of concept 10, mined deep borehole matrix.....	166
Fig. B.17: Illustration of the safety concept in the case of geological disposal of heat-emitting wastes	167
Fig. B.18: Safety functions over time	168
Fig. B.19: The KBS-3 concept for disposal of spent nuclear fuel	171
Fig. B.20: Safety functions, safety function indicators and safety function indicator criteria	172
Fig. B.21: Safety function “Resisting the circulation of water”	174
Fig. B.22: Safety function “Limiting the release of radioactive nuclides and immobilising them in the repository”	175
Fig. B.23: Safety function “Limiting and reducing the migration of radioactive nuclides”	175
Fig. B.24: Map of rock salt and argillaceous rock formations in Germany worthy of further investigation	178
Fig. B.25: Key repository operating and closing stages	181
Fig. B.26: Typical model compartments and chain for assessing potential long-term consequences assuming a release scenario.....	185
Fig. B.27: Timescales and limited reliability of predictions for systems relevant in safety assessments.....	187
Fig. B.28: Structure and evolution of a Safety Case	188
Fig. B.29: Classical dose response curves for radiation effects	201
Fig. B.30: System of dose quantities for use in radiological protection... ..	204
Fig. B.31: Estimated radiation doses caused by release of radioactive material from the canisters with high level waste (HLW) in granite	219
Fig. B.32: Concentration of radon in soil air one meter of depth in Germany	224
Fig. B.33: Range of effective doses per person and year from natural sources worldwide	226
Fig. C.1: Estimated excess relative risk (ERR) in Hiroshima and Nagasaki ...	361
Fig. C.2: Deviation of cancer mortality from the average (‰) in 1996–2005 (SEER-USA) and radiation effect.....	362
Fig. C.3: Repair kinetics of DSBs in lymphocytes of humans	364
Fig. C.4: Possibilities of extrapolation into the lower dose range	365
Fig. C.5: Mechanism of cancer development	368

Tables

Tab. B.1: Typical waste characteristics	114
Tab. B.2: Exemplary impact of increasing burn-up on the back-end of the fuel cycle	119
Tab. B.3: Current fuel cycle options in selected countries	120
Tab. B.4: Summary of the uncertainties	127
Tab. B.5: Burn-ups (MWd/kgU) giving $k_{eff}=0.95$ for different enrichments including uncertainties	128
Tab. B.6: Examples of storage facilities for SNF and long-lived radioactive wastes in OECD member countries	131
Tab. B.7: Long-term management options.....	133
Tab. B.8: Inventories of safety-relevant radionuclides in a reference canister containing 9 BWR UO ₂ fuel assemblies	141
Tab. B.9: Inventories of safety-relevant radionuclides in a canister containing 3 PWR UO ₂ and 1 MOX fuel assemblies.....	142
Tab. B.10: Inventories of safety-relevant radionuclides in a canister containing 4 PWR UO ₂	143
Tab. B.11: Average safety-relevant radionuclide content of a single BNFL HLW glass flask.....	146
Tab. B.12: Average safety-relevant radionuclide content of a single COGEMA HLW glass flask.....	147
Tab. B.13: Estimated number of geological repositories in the USA, for the different scenarios of the cumulative spent fuel in 2100.....	150
Tab. B.14: Criteria applied to screen out various options	151
Tab. B.15: Options and variants shortlisted for HLW/SNF.....	152
Tab. B.16: Key features and variants leading to the disposal concepts.....	161
Tab. B.17: Relationship of a selection of host rock properties to fundamental requirements for waste disposal.....	169
Tab. B.18: Features of potential host rocks relevant for disposal	170
Tab. B.19: Primary safety functions assigned to engineered anthropo- genic and natural geogenic parts of the repository system.	177
Tab. B.20: Radiation weighting, factors in ICRP recommendation (2007).....	204

Tab. B.21: Tissue Weighting Factors, wT in ICRP Recommendations	205
Tab. B.22: Coefficients for committed effective dose (Sv/Bq) and committed effective dose (Sv) for radionuclides	215
Tab. B.23: Coefficients for committed effective dose (Sv/Bq) and committed effective dose (Sv) for radionuclides in a reference canister after storage of 40 years and 10,000 years storage in a repository	217
Tab. B.24: Coefficients for committed effective dose (Sv/Bq) and committed effective dose (Sv) for radionuclides in a reference canister after storage of 40 years and one million years storage in a repository	218
Tab. B.25: Proportions of a cell population traversed by tracks for various average doses from γ -rays and α -particles.....	221
Tab. B.26: Radiation exposures from natural sources.....	223
Tab. B.27: Radiation exposure of humans in different areas of life in Germany.....	225

List of Authors

Gethmann, Professor Dr. phil. habil. Carl Friedrich, studies of philosophy at Bonn, Innsbruck and Bochum; 1968 lic. phil. (Institutum Philosophicum Oenipontanum); 1971 doctorate Dr. phil. at the Ruhr-Universität Bochum; 1978 Habilitation for philosophy at the University of Konstanz. 2003 honorary degree of doctor of philosophy (Dr. phil. h.c.) of the Humboldt-Universität Berlin. 2009 Honorary professor at the Universität zu Köln. 1968 scientific assistant; 1972 Professor of Philosophy at the University of Essen; 1978 private lecturer at the University of Konstanz; since 1979 Professor for philosophy at the University of Essen; lectures at the universities of Essen and Göttingen. Called to the Board of Directors at the Akademie für Technikfolgenabschätzung Baden-Württemberg combined with a full professorship of Philosophy (1991, refused) and to full professorship at the universities of Oldenburg (1990, refused), Essen (1991, accepted), Konstanz (1993, refused) and Bonn (1995, refused). Since 1996 Director of the Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH (European academy for the study of the consequences of scientific and technological advance). Member of the Academia Europaea (London); member of the Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften; member of the Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (Halle); member of the Bio-Ethikkommission des Landes Rheinland-Pfalz. 2006–2008 President of the “Deutsche Gesellschaft für Philosophie e.V.” Since 2008: Member of the Deutsche Akademie der Technikwissenschaften “acatech”.

Main fields of research: linguistic philosophy/philosophy of logic; phenomenology and practical philosophy (ethics of medicine/ethics of environment/technology assessment).

Kamp, Dr. phil. Georg, 1979–1982 merchandising apprenticeship; 1982–1984 retail salesman; 1987–1993 studies in philosophy and German literature and linguistics in Bochum, Duisburg and Essen; 1993–1998 scientific assistant at the Institut für Philosophie at the Universität Duisburg-Essen; 1993–1998 Ph.D. studies, graduation with a thesis on “Praktische Sprachen. Zur Möglichkeit und Gestaltung des Argumentierens in regulativen Kontexten” at the Universität Essen. 1999–2002 member of scientific staff of the Europäische Akademie GmbH. 2002–2005 freelance consultant, lecturer and editor (during parental leave). 2005–2006 Cooperative Education

“Master of Mediation” at the FernUniversität Hagen. 2005–2006 Co-ordinator of the project “continuo – Diskontinuierliche Erwerbsbiographien und Beschäftigungsfähigkeit in kleinen und mittleren Unternehmen”.

Since 2006 member of the scientific staff of the Europäische Akademie GmbH.

Kröger, Professor Dr.-Ing. habil. Wolfgang, studied mechanical engineering, specialized on nuclear technology, at the RWTH Aachen. He received his diploma degree in 1972, his doctoral degree in 1974 and the *venia legendi* in 1986. From 1974 to 1989 he was employed at the German Research Centre Jülich, finally as director of the Institute for Nuclear Safety Research. His research aimed to develop advanced reactor concepts and related methods for comprehensive safety assessment.

In 1990 Kröger became professor for safety technology (analysis) at the ETH Zurich and director of the Research Department on Nuclear Energy and Safety at the national Paul Scherrer Institut (PSI), Switzerland. At ETH, as director of the Lab of Safety Analysis he has mainly contributed to the development of risk and vulnerability analysis of large scale, complex engineered systems including energy supply infrastructure and to approach risk assessment issues in a multidisciplinary, trans-sectorial way. On his initiative, the International Risk Governance Council was established in 2003 at Geneva and he became its founding rector. At the beginning of 2011 he became managing director of the ETH Risk Center.

Kröger has worked in distinguished international committees and advisory boards, authored numerous publications, contributed to various books and is co-editor of various books. Inter alia he is member of the Scientific Directorate of the German Council on Foreign Relations, individual member of the Swiss Academy of Engineering Sciences and honorary member of the Swiss Nuclear Society.

Rehbinder, Professor Dr. iur. Eckard, Professor emeritus of Economic Law, Environmental Law and Comparative Law at the Goethe-University Frankfurt/Main, Member of the Research Centre for Environmental Law at the same university. He studied law at the University Frankfurt/Main and the Free University Berlin; LL.D. in 1965 and habilitation in 1968 at the former University. From 1969 to 1972 he was Professor of Law at the University Bielefeld. Since 1972 he has been Professor of Law at the Goethe-University Frankfurt. In the academic year 1981/82 he was dean of the law faculty. Between 1987 and 2000 he was a member, between 1996 and 2000 also the chairman of the German Council of Environmental Policy. Since 1996, he has been a member of the Academy and participated in three further of its research projects. He has been a member of several national and international bodies in the field of environmental law. He was visiting professor in the United States (Ann Arbor und Berkeley) and several times at the Euro-

pean University Institute (Florence). Apart from the doctoral and the habilitation theses, he published or co-authored a number of books, commentaries and numerous essays in the fields of economic law and since 1972 in particular environmental law. He was awarded the Prix Elizabeth Haub in 1978 and the Bruno H. Schubert Prize in 2004, both for pioneering contributions to environmental law.

Renn, Professor Dr. rer. pol. Dr. sc. tech. h. c. Ortwin, serves as full professor and Chair of Environmental Sociology and Technology Assessment at Stuttgart University (Germany). He directs the Interdisciplinary Research Unit for Risk Governance and Sustainable Technology Development (ZIRN) at Stuttgart University and the non-profit company DIALOGIK, a research institute for the investigation of communication and participation processes in environmental policy making. Since 2006 Renn has been elected Deputy Dean of the Economics- and Social Science Department. He also serves as Adjunct Professor for “Integrated Risk Analysis” at Stavanger University (Norway) and as Contract Professor at the Harbin Institute of Technology and Beijing Normal University.

Ortwin Renn has a doctoral degree in sociology and social psychology from the University of Cologne. His career included teaching and research positions at the Juelich Nuclear Research Center, Clark University (Worcester, USA), the Swiss Institute of Technology (Zürich) and the Center of Technology Assessment (Stuttgart). His honours include an honorary doctorate from the Swiss Institute of Technology (ETH Zürich) and the “Distinguished Achievement Award” of the Society for Risk Analysis (SRA). Among his many political advisory activities the chairmanship of the State Commission for Sustainable Development (German State of Baden-Württemberg) is most prominent. Renn is primarily interested in risk governance, political participation and technology assessment. He has published more than 30 books and 250 articles, most prominently the monograph “Risk Governance” (Earthscan: London 2008).

Röhlig, Professor Dr. rer. nat. Klaus-Jürgen, diploma (1985) and Ph.D. (1989) in mathematics at TU Bergakademie Freiberg. 1989–1991 Institut für Energetik Leipzig. Development and application of computer codes for simulating fluid flow and contaminant migration. 1991–2007 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Research and technical advice to the German Federal Ministry for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) in safety assessment and safety criteria for radioactive waste repositories, policy, regulatory and licensing questions. 2003–2007 deputy head of GRS’ final disposal department. Since 2007, Professor for Repository Systems at the Institute of Disposal Research, Clausthal University of Technology. Research on safety case methodology and analytical assessment of repository systems. Lecturing in the frame of the Mas-

ter Course “Radioactive and Hazardous Waste Management”. Chair of the Integration Group for the Safety Case (IGSC) at OECD/NEA. Member of the Scientific Advisory Board of the French Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). 2008–2010 deputy chair of the Radioactive Waste Management Commission (ESK, an advisory body of BMU), and chair of its Committee on Final Disposal. International peer reviews of safety reports produced in France, Sweden, and in the UK.

Streffer, Professor em. Dr. rer. nat. Dr. med. h. c. Christian, studied Chemistry and Biochemistry at the universities of Bonn, Tübingen, Munich, Hamburg and Freiburg; Ph.D. in Biochemistry January 1963. Postdoctoral fellowship at the Department of Biochemistry, University of Oxford; 1971 Professor (C3) for Radiobiology at the University of Freiburg i. Br. From 1974 until 1999 he was full Professor for Medical Radiobiology at the University of Essen, 1988–1992 vice chancellor of the University, 1999 Emeritus. Guest Professorships: 1985 University of Rochester, N.Y., USA; 2000 University of Kyoto, Japan. Honorary Member of several scientific societies, 1995 Honorary Doctor of the University of Kyoto. Streffer is member of the Institute for Science and Ethics of the university of Bonn, Emeritus member of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Several scientific awards, e.g. 2008 Sievert Award of the International Radiation Protection Association (IRPA); 2009 Distinguished Service Award of the Radiation Research Society, U.S.A.

His main research interests are: radiation risk especially during the prenatal development of mammals; combined effects of radiation and chemical substances; experimental radiotherapy of tumours, especially individualization of cancer therapy by radiation.



EUROPÄISCHE AKADEMIE

zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Direktor: Professor Dr. Dr. h. c. Carl Friedrich Gethmann

The Europäische Akademie

The Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen GmbH is concerned with the scientific study of consequences of scientific and technological advance for the individual and social life and for the natural environment. The Europäische Akademie intends to contribute to a rational way of society of dealing with the consequences of scientific and technological developments. This aim is mainly realised in the development of recommendations for options to act, from the point of view of long-term societal acceptance. The work of the Europäische Akademie mostly takes place in temporary interdisciplinary project groups, whose members are recognised scientists from European universities. Overarching issues, e.g. from the fields of Technology Assessment or Ethic of Science, are dealt with by the staff of the Europäische Akademie.

The Series

The series Ethics of Science and Technology Assessment (Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung) serves to publish the results of the work of the Europäische Akademie. It is published by the academy's director. Besides the final results of the project groups the series includes volumes on general questions of ethics of science and technology assessment as well as other monographic studies.

Acknowledgement

The project "Radioactive Waste. Technical and Normative Aspects of its Disposal" was supported by the VGB PowerTech e.V. The content of the book is only the authors' responsibility.

Further volumes of the series *Ethics of Science and Technology Assessment* (Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung):

- Vol. 1: A. Grunwald (ed) *Rationale Technikfolgenbeurteilung. Konzeption und methodische Grundlagen*, 1998
- Vol. 2: A. Grunwald, S. Saupe (eds) *Ethik in der Technikgestaltung. Praktische Relevanz und Legitimation*, 1999
- Vol. 3: H. Harig, C. J. Langenbach (eds) *Neue Materialien für innovative Produkte. Entwicklungstrends und gesellschaftliche Relevanz*, 1999
- Vol. 4: J. Grin, A. Grunwald (eds) *Vision Assessment. Shaping Technology for 21st Century Society*, 1999
- Vol. 5: C. Streffer et al., *Umweltstandards. Kombinierte Expositionen und ihre Auswirkungen auf den Menschen und seine natürliche Umwelt*, 2000
- Vol. 6: K.-M. Nigge, *Life Cycle Assessment of Natural Gas Vehicles. Development and Application of Site-Dependent Impact Indicators*, 2000
- Vol. 7: C. R. Bartram et al., *Humangenetische Diagnostik. Wissenschaftliche Grundlagen und gesellschaftliche Konsequenzen*, 2000
- Vol. 8: J. P. Beckmann et al., *Xenotransplantation von Zellen, Geweben oder Organen. Wissenschaftliche Grundlagen und ethisch-rechtliche Implikationen*, 2000
- Vol. 9: G. Banse, C. J. Langenbach, P. Machleidt (eds) *Towards the Information Society. The Case of Central and Eastern European Countries*, 2000
- Vol. 10: P. Janich, M. Gutmann, K. Prieß (eds) *Biodiversität. Wissenschaftliche Grundlagen und gesellschaftliche Relevanz*, 2001
- Vol. 11: M. Decker (ed) *Interdisciplinarity in Technology Assessment. Implementation and its Chances and Limits*, 2001
- Vol. 12: C. J. Langenbach, O. Ulrich (eds) *Elektronische Signaturen. Kulturelle Rahmenbedingungen einer technischen Entwicklung*, 2002
- Vol. 13: F. Breyer, H. Kliemt, F. Thiele (eds) *Rationing in Medicine. Ethical, Legal and Practical Aspects*, 2002
- Vol. 14: T. Christaller et al., *Robotik. Perspektiven für menschliches Handeln in der zukünftigen Gesellschaft*, 2001
- Vol. 15: A. Grunwald, M. Gutmann, E. Neumann-Held (eds) *On Human Nature. Anthropological, Biological, and Philosophical Foundations*, 2002
- Vol. 16: M. Schröder et al., *Klimavorhersage und Klimavorsorge*, 2002
- Vol. 17: C. F. Gethmann, S. Lingner (eds) *Integrative Modellierung zum Globalen Wandel*, 2002
- Vol. 18: U. Steger et al., *Nachhaltige Entwicklung und Innovation im Energiebereich*, 2002
- Vol. 19: E. Ehlers, C. F. Gethmann (eds) *Environmental Across Cultures*, 2003
- Vol. 20: R. Chadwick et al., *Functional Foods*, 2003
- Vol. 21: D. Solter et al., *Embryo Research in Pluralistic Europe*, 2003
- Vol. 22: M. Decker, M. Ladikas (eds) *Bridges between Science, Society and Policy. Technology Assessment – Methods and Impacts*, 2004
- Vol. 23: C. Streffer et al., *Low Dose Exposures in the Environment. Dose-Effect Relations and Risk-Evaluation*, 2004

- Vol. 24: F. Thiele, R. A. Ashcroft (eds) *Bioethics in a Small World*, 2004
- Vol. 25: H.-R. Duncker, K. Prieß (eds) *On the Uniqueness of Humankind*, 2005
- Vol. 26: B. v. Maydell, K. Borchardt, K.-D. Henke, R. Leitner, R. Muffels, M. Quante, P.-L. Rauhala, G. Verschraegen, M. Żukowski, *Enabling Social Europe*, 2006
- Vol. 27: G. Schmid, H. Brune, H. Ernst, A. Grunwald, W. Grünwald, H. Hofmann, H. Krug, P. Janich, M. Mayor, W. Rathgeber, U. Simon, V. Vogel, D. Wyrwa, *Nanotechnology. Assessment and Perspectives*, 2006
- Vol. 28: M. Kloepfer, B. Griefahn, A. M. Kaniowski, G. Klepper, S. Lingner, G. Steinebach, H. B. Weyer, P. Wysk, *Leben mit Lärm? Risikobeurteilung und Regulation des Umgebungslärms im Verkehrsbereich*, 2006
- Vol. 29: R. Merkel, G. Boer, J. Fegert, T. Galert, D. Hartmann, B. Nuttin, S. Rosahl, *Intervening in the Brain. Changing Psyche and Society*, 2007
- Vol. 31: G. Hanekamp (ed) *Business Ethics of Innovation*, 2007
- Vol. 32: U. Steger, U. Büdenbender, E. Feess, D. Nelles, *Die Regulierung elektrischer Netze. Offene Fragen und Lösungsansätze*, 2008
- Vol. 33: G. de Haan, G. Kamp, A. Lerch, L. Martignon, G. Müller-Christ, H. G. Nutzinger, *Nachhaltigkeit und Gerechtigkeit. Grundlagen und schulpraktische Konsequenzen*, 2008
- Vol. 34: M. Engelhard, K. Hagen, M. Boysen (eds) *Genetic Engineering in Livestock. New Applications and Interdisciplinary Perspectives*, 2008
- Vol. 35: M. Engelhard, K. Hagen, R. B. Jørgensen, R. Pardo Avellaneda, E. Reh binder, A. Schnieke, F. Thiele, *Pharming. Promises and risks of biopharmaceuticals derived from genetically modified plants and animals*, 2008
- Vol. 36: B. Droste-Franke, H. Berg, A. Kötter, J. Krüger, K. Mause, J.-C. Pielow, I. Romey, T. Ziesemer, *Brennstoffzellen und Virtuelle Kraftwerke. Energie-, umwelt- und technologiepolitische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung*, 2009
- Vol. 37: M. Bölker, M. Gutmann, W. Hesse (eds) *Information und Menschen bild*, Berlin 2010
- Vol. 38: C. Streffer, C. F. Gethmann, G. Kamp, W. Kröger, E. Reh binder, O. Renn, K.-J. Röhlig, *Radioactive Waste. Technical and Normative Aspects of its Disposal*, Berlin 2011

Also the following studies were published by Springer:

Environmental Standards. Combined Exposures and Their Effect on Human Beings and Their Environment, 2003, Translation Vol. 5

Sustainable Development and Innovation in the Energy Sector, 2005, Translation Vol. 18

F. Breyer, W. van den Daele, M. Engelhard, G. Gubernatis, H. Kliemt, C. Kopetzki, H. J. Schlitt, J. Taupitz, *Organmangel. Ist der Tod auf der Warteliste unvermeidbar?* 2006

Radioactive Waste

Technical and Normative Aspects of its Disposal

Waste caused by the use of radioactive material in research, medicine and technologies, above all high level waste from nuclear power plants, must be disposed of safely. However, the strategies discussed for the disposal of radioactive waste as well as proposals for choosing a proper site for final waste disposal are strongly debated.

An appropriate disposal must satisfy complex technical requirements and must meet stringent conditions to appropriately protect man and nature from risks of radioactivity over very long periods. Ethical, legal and social conditions must be considered as well. An interdisciplinary team of experts from relevant fields compiled the current status and developed criteria as well as strategies which meet the requirements of safety and security for present and future generations. The study also provides specific recommendations that will improve and optimize the chances for the selection of a repository site implementing the participation of stakeholders including the general public and not neglecting the responsibility of the legal institutions.

The study provides an advanced and, due to its interdisciplinary approach, novel contribution to the corresponding scientific debates including normative and social aspects of acceptability and acceptance. At the same time it serves as a contribution to public and political debates presenting an easily comprehensible executive summary and describing practicable recommendations.



Radioactive Waste
Technical and Normative Aspects of its Disposal

ISBN 978-3-642-22924-4



9 783642 229244