

Auswirkungen des Ein-Endlager-Konzeptes auf die Entwicklung und Durchführung des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte

1. Hintergrund und Aufgabenstellung
2. Beurteilungsfelder und Beurteilungsaspekte
3. Diskussion der als bedeutsam angesehenen Beurteilungsfelder/-aspekte
 - 3.1 Entsorgungskonzeptionelle Aspekte
 - 3.2 Langzeitsicherheit
 - 3.2.1 Sicherheitstechnische Aspekte des Wärmeeintrags
 - 3.2.2 Sicherheitstechnische Aspekte der Gasbildung
 - 3.2.3 Sicherheitstechnische Aspekte bei chemischen Wechselwirkungen
 - 3.3 Nachweisverfahren
4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1. Hintergrund und Aufgabenstellung

Der Arbeitskreis hat den Auftrag, ein nachvollziehbares Verfahren für die Auswahl von Standorten zur Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle in Deutschland zu entwickeln. Das Verfahren soll die Beteiligung der Öffentlichkeit in geeigneter Form vorsehen und fundierte Kriterien beinhalten. Die Entwicklung soll auf wissenschaftlicher Basis sachorientiert, unvoreingenommen und ohne Ausschluss relevanter Aspekte erfolgen. Dabei sollen die Vorgehensweisen und Erfahrungen in anderen Ländern berücksichtigt werden. Der Arbeitskreis soll seine Überlegungen schon während ihrer Entwicklung mit der nationalen und internationalen Fachwelt und mit der interessierten Öffentlichkeit erörtern.

Als Randbedingung für die Verfahrensentwicklung hat das BMU die folgenden zwei politischen Zielsetzungen vorgegeben (siehe auch /1/ und /2/):

- Alle radioaktiven Abfälle sollen in tiefen geologischen Formationen in Deutschland endgelagert werden.
- Für die Endlagerung aller Arten und Mengen radioaktiver Abfälle reicht ein Endlager aus, das ab 2030 betriebsbereit sein soll (Ein-Endlager-Konzept).

Es ist nicht Aufgabe des Arbeitskreises, das Auswahlverfahren durchzuführen, das Verfahren bzw. die Kriterien auf die Auswahl oder Eignungsbeurteilung von Gorleben oder Konrad anzuwenden oder andere Standorte auszuwählen oder zu bewerten.

Der Arbeitskreis ist ein fachlich-wissenschaftliches Gremium, das sich mit Anregungen und kritischen Anmerkungen aus Fachkreisen und der Öffentlichkeit auseinandersetzt, um seinem Auftrag gerecht zu werden.

Anmerkungen hat der Arbeitskreis insbesondere zu der Zielsetzung des Bundes, für alle Arten von radioaktiven Abfällen nur ein Endlager zu schaffen, auf verschiedensten Veranstaltungen entgegen genommen. Der Arbeitskreis hat in seinen Gesprächen, wie auch BMU-Staatssekretär Baake auf dem 1. Workshop des AkEnd in Kassel, darauf hingewiesen, dass diese Zielsetzung hinsichtlich Umsetzbarkeit und Auswirkungen insbesondere unter sicherheitstechnischen und entsorgungskonzeptionellen Aspekten noch zu prüfen sei /3/.

Das Ein-Endlager-Konzept zeichnet sich dadurch aus, dass alle Arten radioaktiver Abfälle (einschließlich abgebrannter Brennelemente) gemeinsam in nur einem Endlager im tiefen geologischen Untergrund endgelagert werden sollen. Wahrscheinlich werden die Abfälle, nach Abfallart differenziert, in verschiedenen, u.U. getrennten Endlagerbereichen innerhalb ein und desselben Gesteinskörpers eingelagert. Die Endlagerbereiche für unterschiedliche Abfälle müssen allerdings nicht zwangsläufig im Endlagerniveau durch Strecken miteinander verbunden sein. Die übertägigen und gegebenenfalls Teile der untertägigen Infrastruktureinrichtungen stehen für die verschiedenen Endlagerbereiche gemeinsam zur Verfügung. Das Endlager hat mindestens zwei Schächte.

Das vorliegende Positionspapier des AkEnd liefert einen Beitrag zu dieser Prüfung und versucht aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich aus dieser Vorgabe auf die Entwicklung des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte und das spätere Auswahlverfahren selbst ergeben könnten.

2. Beurteilungsfelder und Beurteilungsaspekte

Der AkEnd hat sich mit der Frage befasst, welche Auswirkungen das Ein-Endlager-Konzept auf die Entwicklung bzw. Durchführung des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte haben könnte. Auswirkungen wären u.U. dann zu erwarten, wenn die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Abfallarten differenzierte Anforderungen an das Endlager bzw. Endlagergestein stellen. Die Aufteilung der radioaktiven Abfälle auf mehrere Endlager könnte vor allem dann Sinn machen, wenn sich sicherheitstechnische Vorteile ergäben, wenn der Nachweis der Langzeitsicherheit der Endlagerung leichter zu führen wäre oder wenn ohne die Aufteilung die Auswahl eines Standortes erschwert bzw. eingeschränkt würde. Neben diesen sicherheitstechnischen Aspekten sind bei der Diskussion aber auch noch andere Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Daher wird in diesem Kapitel zunächst eine Gesamtschau möglicher Beurteilungsfelder und Beurteilungsaspekte gegeben.

In Tabelle 1 sind die übergreifenden Beurteilungsfelder und dazugehörigen Beurteilungsaspekte zusammengestellt, die aus der Sicht des AkEnd für die Beantwortung der Frage nach Auswirkungen des Ein-Endlager-Konzeptes bedeutsam sind. Die Aufstellung enthält sowohl technisch-wissenschaftliche als auch eher gesellschaftlich, politisch oder ökonomisch ausgerichtete Beurteilungsfelder.

Übergreifende Beurteilungsfelder, wie entsorgungskonzeptionelle Aspekte und Entsorgungssicherheit, weisen enge inhaltliche Beziehungen zu Einzelaspekten in konkreteren technisch-wissenschaftlichen Beurteilungsfeldern auf. Das Ergebnis ihrer Beurteilung hängt maßgeblich von den Ergebnissen der technisch-wissenschaftlichen Bewertung ab. Beispielsweise ist die Realisierbarkeit einer Option (Beurteilungsfeld Entsorgungssicherheit) nicht zuletzt davon abhängig, wie die im Beurteilungsfeld Langzeitsicherheit genannten Aspekte beurteilt werden.

Bei einigen Beurteilungsfeldern und –aspekten können sich u.U. Bewertungsunterschiede bereits allein aus der unterschiedlichen Anzahl der Standorte ergeben. Das könnte etwa für die Gesamtanzahl der Schächte gelten, die nach Betriebsende der Anlage(n) zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zuverlässig verfüllt und versiegelt werden müssen. Andere Beurteilungsfelder bzw. –aspekte sind nicht unmittelbar für die Frage von Bedeutung, sondern indirekt über ihren Bezug zu bestimmten Wirtsgesteinstypen. Das gilt beispielsweise für die Aspekte natürliche Strahlung, Wärmeeintrag, Gasentwicklung und chemische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Abfällen. Bei wieder anderen Aspekten ist die konzeptionelle Bedeutung in auffälliger Weise von der Betriebsdauer des Bergwerks bzw. der Bergwerke abhängig. Hierzu gehören insbesondere die Kosten, aber auch die Auswirkungen natürlicher Strahlung.

Die einzelnen Beurteilungsfelder bzw. –aspekte in Tabelle 1 wurden dahingehend gewichtet, ob sie im Hinblick auf das Auswahlverfahren mehr oder weniger stark von Bedeutung sind. Die Zuordnung beruht im wesentlichen auf abstrakten grundsätzlichen Überlegungen. Sie sind das Ergebnis zweier Diskussionsrunden, die hierzu im AkEnd geführt wurden.

Danach sind einzelne Aspekte der folgenden Beurteilungsfelder für die Konzeptentscheidung wahrscheinlich nicht von großer Bedeutung, bei der Optionsüberprüfung bzw. später bei der detaillierten Konzeptentwicklung aber dennoch zu betrachten:

- Entsorgungssicherheit
- Anforderungen an die Abfälle
- Sicherheit in der Betriebsphase
- Kritikalität
- Safeguards
- Umweltauswirkungen
- Akzeptanz

Von großer Bedeutung sind hingegen die Beurteilungsfelder (bzw. einzelne Aspekte daraus):

- Entsorgungskonzeptionelle Aspekte
- Langzeitsicherheit
- Nachweisverfahren
- Kosten

Da die Kosten keinen direkten Bezug zur Aufgabenstellung des AkEnd aufweisen, verbleiben für die detaillierte Betrachtung die entsorgungskonzeptionellen Aspekte, die Langzeitsicherheit und das Nachweisverfahren. Auf sie wird im folgenden Kapitel eingegangen.

3. Diskussion der als bedeutsam angesehenen Beurteilungsfelder /-aspekte

3.1 Entsorgungskonzeptionelle Aspekte

Im Hinblick auf die Auswirkungen auf das Auswahlverfahren für Endlagerstandorte wird hier nur der zeitlich unterschiedliche Anfall der verschiedenen Abfälle betrachtet. Bei der Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die geltende Aufteilung der Abfälle nach

- Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und
- wärmeentwickelnden Abfällen

beibehalten wird. Es wäre ebenso eine Aufteilung nach radioaktiven Abfällen mit kurzlebigen bzw. langlebigen Radionukliden denkbar. Eine solche Änderung der Aufteilung und damit Umstellung der Konditionierung hätte jedoch umfangreiche entsorgungskonzeptionelle Auswirkungen. Der voraussichtliche zeitliche Anfall an wärmeentwickelnden Abfällen und an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist in den beiden folgenden Tabellen 2 und 3 zusammengestellt, wobei der in der Vereinbarung vom 14. Juni 2000 festgelegte Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung /2/ berücksichtigt wurde.

Unter Berücksichtigung angemessener Zwischenlagerzeiten für verglaste hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle und direkt endzulagernde abgebrannte Brennelemente erscheint die Inbetriebnahme eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle ab 2030 unter sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll. Auslegungsbestimmend für ein derartiges Endlager ist vor allem der Wärmeeintrag durch die direkt endzulagernden LWR-Brennelemente, gefolgt von den HAW-Kokillen. Alle anderen wärmeentwickelnden Abfälle spielen hinsichtlich des Wärmeeintrags in das Endlager, aber auch hinsichtlich der Radioaktivität der vor allem langlebigen Radionuklide eine untergeordnete Rolle. Größenordnungsmäßig werden durch die wärmeentwickelnden Abfälle

der Tabelle 2 zum Zeitpunkt der Endlagerung (d.h. bei 30 bis 40 Jahren Kühlzeit) folgende Wärmemengen in das Endlager eingebracht:

LWR-BE	10.000 kW
HAW-Kokillen	3.000 kW
MAW(Q)	200 kW
AVR+THTR	< 20 kW
VKTA, FRM-II BE vernachlässigbar	

Tabelle 2: Anfall an wärmeentwickelnden Abfällen bis 2040

	Bestand Ende 2000	Prognose 2001 – 2010	Prognose 2011 – 2020	Prognose 2021 – 2030	Prognose 2031 – 2040	Summe	Gesamt- volumen *
Anzahl							m³
HAW-Kokillen	84	4.582	112	0	0	4.778	908
Gebinde MAW (Q)	0	840	7.576	2.400	0	10.816	2.814
Kugel-Brennelemente AVR + THTR	908.705	0	0	0	0	908.705	1.890
Mg							
Brennelemente LWR	3.142	3.962	1.819	24	0	8.947	18.258
Brennelemente VKTA	2,3	0	0	0	0	2,3	49
Brennelemente FRM-II	0	0,35	0,35	0,35	0,35	1,4	108
							ca. 24.000

* Randbedingungen:

HAW:	4.778 Kokillen x 0,19 m ³
MAW (Q):	8.764 Kokillen x 0,19 m ³ 2.052 Fässer x 0,56 m ³
AVR+THTR:	450 Castor THTR x 4,2 m ³
LWR:	1.790 POLLUX x 10,2 m ³
VKTA:	18 Castor MTR2 x 2,7 m ³
FRM-II:	40 Castor MTR2 x 2,7 m ³

Erläuterungen:

Verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle
Konditionierte mittelradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle
Kugel-Brennelemente der Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR
Brennelemente von Leichtwasserreaktoren
Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors
Brennelemente des Forschungsreaktors München II

Tabelle 3: Anfall an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bis 2040 [m³]

	Bestand Ende 2000	Prognose 2001 – 2010	Prognose 2011 – 2020	Prognose 2021 – 2030	Prognose 2031 – 2040	Summe
EVU	23.000	31.000	46.000	73.000	22.000	195.000
Öffentliche Hand	53.000	27.000	8.000	3.000	11.000	102.000
Summe	76.000	58.000	54.000	76.000	33.000	297.000

Aus Tabelle 2 sind der öffentlichen Hand zuzuordnen: 130 HAW-Kokillen aus der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe, die Kugeln aus den beiden Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR, 640 Mg LWR Brennelemente aus Greifswald und Rheinsberg sowie die Brennelemente des VKTA und des FRM-II. Hauptnutznießer eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle sind somit die EVUs.

Anders stellt sich jedoch die Situation bei den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung dar. Ende 2000 existierten davon in Deutschland ca. 76.000 m³ endlagerfähige Abfälle. Etwa 70% davon (53.000 m³) sind der öffentlichen Hand (Forschungseinrichtungen, EWN, Landessammelstellen) zuzuordnen. Abfälle gerade aus Forschungseinrichtungen enthalten in gewissem Umfang auch langlebige α -strahlende Radionuklide, die am sichersten in einem Endlager aufgehoben sind. Die Abfallmengen der öffentlichen Hand werden sich aufgrund der bereits begonnenen intensiven Rückbautätigkeiten auf etwa 80.000 m³ in den nächsten 10 Jahren erhöhen. Anschließend sind nur noch vergleichsweise geringe Zuwächse zu erwarten. Bei den EVUs hingegen ist mit einer stärkeren Zunahme des Abfallaufkommens erst nach 2015/20 zu rechnen, wenn in größerem Umfang von den EVUs betriebene Kernkraftwerke stillgelegt und rückgebaut werden.

Beurteilung:

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund wird aus sicherheitstechnischer Sicht grundsätzlich günstiger beurteilt als eine längerfristige oberirdische Zwischenlagerung. Es ist daher immer erstrebenswert, möglichst früh ein Endlager für alle radioaktiven Abfälle zur Verfügung zu haben. Die in großen Mengen anfallenden radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung könnten bei Vorhandensein eines Endlagers nach ihrer Konditionierung zur Erfüllung der Endlagerbedingungen schon jetzt endgelagert werden. Bei den in bedeutend geringeren Mengen (Verhältnis ca. 1 : 10) anfallenden wärmeentwickelnden Abfällen empfiehlt sich eine Zwischenlagerung von größenordnungsmäßig 20 bis 30 Jahren zum teilweisen Abklingen der Nachzerfallswärme, um die nachfolgende Endlagerung einfacher und sicherer zu gestalten. Weiterhin ist zu beachten, dass nach dem Jahr 2040 voraussichtlich nur noch sehr wenige Abfälle mit einem gegenüber heute sehr unterschiedlichem Abfallspektrum (kaum langlebige Radionuklide) anfallen, was gegenüber heute evtl. zu einer anderen Aufteilung der Abfälle und einer anderen Endlagerkonzeption führen könnte.

3.2 Langzeitsicherheit

Hier wurden vor allem die „Robustheit“ und das „Systemverhalten“ beim Langzeitsicherheitsnachweis als bedeutsame Beurteilungsaspekte angesehen. Als besonders wichtige Einflussgrößen mit Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit wurden vom AkEnd identifiziert: der Wärmeeintrag, die Gasentwicklung der Abfälle und chemische Wechselwirkungen unterschiedlicher Abfallarten.

3.2.1 Sicherheitstechnische Aspekte des Wärmeeintrags

Durch die gemeinsame Einlagerung von wärmeerzeugenden Abfällen und Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in einem Endlager besteht im Prinzip die Möglichkeit, dass die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durch die wärmeentwickelnden Abfälle thermisch beeinflusst und erhöhten Temperaturen ausgesetzt werden. Unter diesen Randbedingungen wären folgende Aspekte beim Langzeitsicherheitsnachweis zu berücksichtigen:

- Erhöhte Gasbildung aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durch erhöhte Temperaturen.
- Komplexere Geochemie der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durch erhöhte und sich zeitlich verändernde Temperaturen. Die Beschreibung des Freisetzungs- und Mobilitätsverhaltens von Radionukliden aus dieser Abfallart wäre dadurch erschwert.
- Möglicherweise erhöhte Mobilität der aus den wärmeerzeugenden Abfällen freigesetzten Radionuklide aufgrund der erhöhten Gasbildung aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

Zur Verhinderung einer nachteiligen thermischen Beeinflussung der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen den Einlagerungsfeldern der einzelnen Abfallarten erforderlich. Es ist zu erwarten, dass der Sicherheitsabstand in verschiedenen Wirtsgesteinen unterschiedlich ist. Insofern sind Aussagen über das tatsächlich benötigte Endlagervolumen wirtsgesteinsabhängig. Die aufgezeigten Probleme lassen sich beim Ein-Endlager-Konzept ohne größere Schwierigkeiten lösen.

3.2.2 *Sicherheitstechnische Aspekte der Gasbildung*

Abfälle können in einem Endlager durch Korrosion, Radiolyse oder mikrobielle Zersetzung organischer Bestandteile Gase entwickeln. Schwach- und mittelaktive Abfälle (LAW/MAW) setzen auch ohne äußere Einflüsse aufgrund des Wassergehalts im Gebinde und der mikrobiellen Zersetzung Gas frei. Bei Kontakt mit externen Wässern oder Laugen wird die Gasentwicklung erhöht. Unter Endlagerbedingungen wird für diesen Abfallstrom eine Gasentwicklung aufgrund interner und externer Beeinflussung von einigen 10 Millionen Nm³ abgeschätzt. Hochaktive Abfälle (HAW/abgebrannte Brennelemente (BE)) hingegen produzieren Gase im Wesentlichen nur bei Kontakt mit externen Wässern und Laugen. Die gesamte Gasentwicklung von HAW/BE liegt deutlich niedriger als die von LAW/MAW.

Bei der Standortauswahl für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle muss also darauf geachtet werden, dass keine Wässer oder Laugen an die Abfälle herantreten, um die Gasproblematik zu vermeiden. Lagert man hingegen entsprechend dem Ein-Endlager-Konzept alle Abfälle gemeinsam, hat man wegen der Gasentwicklung des LAW/MAW stets auf die Gasproblematik abzustellen; es ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Standortauswahl.

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Gasbildungsrate der Abfallströme sind die Temperatur, die Feuchte und das chemische Milieu. Die sicherheitstechnische Bedeutung der Gasbildung in der Nachbetriebsphase liegt im möglichen Druckaufbau am Einlagerungsort und damit in der Gefährdung der Integrität der Barrieren. Auch eine Beschleunigung des Radionuklidtransports durch Gase ist nicht auszuschließen.

Bei der Beurteilung der Gasbildung unter dem Aspekt der Standortauswahl und der Langzeitsicherheit eines Endlagers muss man zwischen permeablen und niedrig permeablen Wirtsgesteinen unterscheiden.

Wirtsgesteine mit ausreichend großer Permeabilität sind in der Lage, die entstehenden Gase in ihren Porenräumen oder Kluftsystemen aufzunehmen und einen Druckaufbau zu begrenzen. Ein permeables Wirtsgestein verfügt aber per Definition über mögliche Flüssigkeitszutritts- und -abflusswege, d.h. es ist bei Einlagerung von Abfällen in Kontakt mit Flüssigkeit von einer zusätzlichen externen Gasentwicklung aufgrund von Korrosion und/oder Radiolyse auszugehen. Diese Gasmenge zusammen mit der intern freigesetzten Gasmenge aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung müssen bei der

Abschätzung des notwendigen Speichervolumens ebenso berücksichtigt werden wie der schnellere Druckaufbau durch den Wärmeeintrag der wärmeerzeugenden Abfälle. Eine Endlagerung in permeablem Wirtsgestein stellt dann für alle Arten von Abfällen eine günstige Situation zur Beherrschung der Gasproblematik dar, wenn die Permeabilität und die räumlichen Abmessungen des Wirtsgesteins so groß sind, dass keine nachteiligen Veränderungen des Isolationsvermögens der geologischen Gesamtsituation durch die Gasentwicklung induziert werden. Allerdings erleichtert die erhöhte Permeabilität zugleich den Radionuklidtransport mit dem Grundwasser.

Bei **Wirtsgesteinen mit geringer Permeabilität** kann es durch Gasbildung zu einem Druckaufbau kommen, der zur Schädigung des Gebirges führen kann. Ein niedrig permeables Wirtsgestein ist unter dem Gesichtspunkt der Gasentwicklung für LAW/MAW daher weniger günstig. Hingegen ist die Endlagerung von HAW/BE in niedrig permeablen und insbesondere trockenen Wirtsgesteinen unter dem Aspekt der Gasproblematik unkritisch, da nur bei Wasserzutritt mit einer relevanten Gasproduktion zu rechnen ist. Der Gasproblematik bei LAW/MAW kann durch Konditionierungsmaßnahmen bzw. technische Gegenmaßnahmen im Endlager (z.B. Gassammelräume) entgegengewirkt werden. Allerdings können Gassammelräume mit sicherheitstechnischen Nachteilen im Hinblick auf den angestrebten langfristigen Einschluss der Abfälle verbunden sein.

Hinsichtlich der Gasproblematik im Endlager ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass für Abfälle mit unterschiedlicher Gasentwicklung jeweils verschiedene geologische Voraussetzungen als vorteilhaft zu bezeichnen sind. Sie lassen sich am einfachsten und effektivsten bei einer Aufteilung der Abfälle auf mehrere Endlager erfüllen. Im Hinblick auf die Wirtsgesteinspermeabilität besteht allerdings für die LAW/MAW-Abfälle mit interner und externer Gasentwicklung in jedem Fall ein Zielkonflikt zwischen der Vermeidung kritischer Gasdrücke im Endlager und der Verzögerung des Radionuklidtransports mit dem Grundwasser. Mögliche Lösungsansätze liegen in der Reduzierung der Gasentwicklung durch Abfallbehandlungsmaßnahmen oder technischen Maßnahmen im Endlager zur Vermeidung zu hoher Gasdrücke, wie z.B. Gassammelräumen.

3.2.3 *Sicherheitstechnische Aspekte bei chemischen Wechselwirkungen*

Treten bei einem Endlager nach dem Ein-Endlager-Konzept Fluide in Kontakt mit den eingelagerten Abfällen, sind chemische Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallprodukten im Prinzip möglich. Durch geochemische Wechselwirkungen können die Korrosion der Abfallstoffe sowie die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Lösungen beeinflusst werden. Die veränderten Lösungen wirken sich auf das Korrosionsverhalten der Abfälle und die Mobilität der freigesetzten Nuklide aus. Die wichtigsten Einflussgrößen hierbei sind:

Komplexbildner: Einige LAW/MAW-Abfälle enthalten Dekontaminationsmittel. Bestandteile dieser Dekontaminationsmittel sind u.a. Komplexbildner wie Oxalate und EDTA. Durch diese Komplexbildner kann die Mobilität von Radionukliden wesentlich erhöht werden.

Organische Bestandteile: Ein Teil der LAW/MAW-Abfälle enthält organische Bestandteile. Bei der mikrobiellen Degradation dieser Bestandteile entsteht CO₂. Eine Erhöhung der CO₂-Konzentration führt zur Erhöhung der Carbonatkonzentration im Fluid. Diese wirkt sich direkt auf die Löslichkeit der langlebigen Aktiniden aus. Die Mobilität der Radionuklide ist damit erheblich höher, die Konzentration kann um mehrere Größenordnungen steigen. Einige Bestandteile der Abfälle können als Kolloide in Lösung gehen und somit die Mobilität der Radionuklide erhöhen.

pH-Wert: Der pH-Wert bestimmt vor allem die Löslichkeit der Radionuklide, d.h. die Konzentration der in Lösung befindlichen und damit transportierfähigen Radionuklide. Die Abhängigkeit der Löslichkeit vom pH-Wert ist sehr stark ausgeprägt. Vermischungen zwischen Lösungen aus dem HAW/BE- und dem LAW/MAW-Bereich resultieren in schwer oder nicht prognostizierbaren pH-Werten. Damit fehlen belastbare Löslichkeitsdaten für Langzeitsicherheitsanalysen.

Redoxbedingungen: In tiefen Endlagern werden i.a. reduzierende geochemische Bedingungen erwartet. Unter diesen Randbedingungen liegen die meisten im HAW/BE vorhandenen langlebigen Radionuklide, z.B. der Elemente Np, U, Pu, Tc, im schwerlöslichen vierwertigen Zustand vor. Oxidierende Abfallkomponenten aus dem LAW/MAW-Bereich können die günstigen Redoxbedingungen verschlechtern mit der Folge, dass dann mit höheren Löslichkeiten und damit höherer Mobilität langlebiger Radionuklide gerechnet werden muss.

Falls geochemische Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Abfallarten im Grubengebäude nicht ausgeschlossen werden können, ist die Komplexität des geochemisch geführten Langzeitsicherheitsnachweises signifikant höher als bei strikter Trennung der verschiedenen Abfallarten. Die Mindestanforderung an eine strikte Trennung ist die Forderung, dass die verschiedenen Einlagerungsbereiche im Endlagerniveau nicht mit Strecken verbunden sein dürfen. Zu klären ist noch, ob eine strikte Trennung der Einlagerungsbereiche mit der gemeinsamen Nutzung von Schächten kompatibel ist. Zweifel sind hier anzumelden. Es ist ferner gegenwärtig nicht auszuschließen, dass eine mögliche Vermischung von Radionuklidströmen aus unterschiedlichen Endlagerbereichen auch im Fernbereich des Endlagers verhindert werden muss. Am einfachsten und sichersten ließen sich die angesprochenen Probleme durch die Aufteilung der Abfälle auf verschiedene Endlager lösen.

Beurteilung:

Zusammenfassend lässt sich zu den Beurteilungsaspekten „Robustheit/Systemverhalten“ sagen, dass bei Verfolgung des Ein-Endlager-Konzeptes hinsichtlich der Langzeitsicherheit u.U. Kompromisse geschlossen werden müssen. Ferner wird die Auswahl an Standorten, die alle Anforderungen optimal erfüllen, wahrscheinlich eingeschränkt sein.

3.3 Nachweisverfahren

Hier wurde der Beurteilungsaspekt „Prognostizierbarkeit Systemverhalten“ als bedeutsam identifiziert.

Im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern ist für alle dort abzulagernden Abfälle nachzuweisen, dass die Schutzziele langfristig eingehalten werden. Dabei sind die „Lebensdauer“ und die Radiotoxizität der Abfälle sowie die von den Abfällen ausgehenden Auswirkungen auf das Wirtsgestein zu berücksichtigen. Aus heutiger Sicht können alle Abfallarten sicher endgelagert werden.

Aus nachweismethodischer Sicht stellt der für Abfälle mit langlebigen Radionukliden erforderliche Isolationszeitraum ein besonderes Problem dar. Aus erkenntnistheoretischer Sicht sind diejenigen Auswirkungen von Abfällen ein Problem, denen das ins Auge gefasste Wirtsgestein in der Vergangenheit noch nicht ausgesetzt gewesen ist.

In Kapitel 3.2 Langzeitsicherheit war darauf hingewiesen worden, dass die Prognostizierbarkeit des Systemverhaltens wesentlich erschwert wird, wenn thermische Beeinflussungen oder chemische Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen

Abfallprodukten nicht auszuschließen sind. Für das Ein-Endlager-Konzept wurde daher eine strikte Trennung der verschiedenen Abfallarten gefordert. Hierfür ist im Rahmen des Nachweisverfahrens zu zeigen, dass diese strikte Trennung auch über säkulare Zeiträume aufrechterhalten bleibt.

Ferner war ausgeführt worden, dass dem Gasproblem durch technische Maßnahmen, wie z.B. Gassammelräume, eventuell beizukommen ist. Auch für das Funktionieren derartiger technischer Maßnahmen über extrem lange Zeiträume wäre der Nachweis zu führen.

Beurteilung:

Insgesamt gesehen dürfte der Langzeitsicherheitsnachweis bei einem Ein-Endlager-Konzept schwieriger zu führen sein. Eine Aufteilung der Abfälle auf zwei oder mehr Endlager würde wahrscheinlich nachweisthechnische Vorteile bringen.

Ergänzend seien einige Anmerkungen zu den als weniger bedeutsam angesehenen Beurteilungsaspekten „Umgang mit Unsicherheiten“, „Nachweiszeitraum“ und „Auswirkungen des über die bisherige thermische Beanspruchung hinausgehenden Wärmeeintrags“ des Beurteilungsfeldes „Nachweisverfahren“ gemacht:

Umgang mit Unsicherheiten: Hier werden keine prinzipiellen Unterschiede bei der gemeinsamen bzw. getrennten Einlagerung von Abfällen gesehen.

Nachweiszeitraum: Auch hier treten keine prinzipiellen Unterschiede auf. Die Aufteilung der Abfälle auf mehrere Endlager würde nur dann günstiger abschneiden, wenn ein Endlager für die relativ großen Mengen ausschließlich kurzlebiger Abfälle und ein zweites Endlager für die bedeutend geringeren Mengen an langlebigen radioaktiven Abfällen gebaut würde. Dies war bisher in Deutschland jedoch nicht beabsichtigt.

Auswirkungen des über die bisherige thermische Beanspruchung hinausgehenden Wärmeeintrags: Unter diesem Aspekt hat die Trennung der Abfälle Vorteile gegenüber der gemeinsamen Einlagerung, sofern eine Aufteilung der Abfälle und damit der Endlager auf wärmeentwickelnde Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung erfolgt. Bei einem Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist die geologische Barriere so gut wie keiner zusätzlichen thermischen Beeinflussung ausgesetzt.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Für die Diskussion der Frage „Auswirkungen des Ein- Endlager-Konzeptes auf das Auswahlverfahren für Endlagerstandorte“ hat der AkEnd vor dem Hintergrund seiner Aufgabenstellung die folgenden Beurteilungsfelder (bzw. einzelne Aspekte daraus) als unter sicherheitstechnischen Aspekten bedeutsam eingestuft:

- Entsorgungskonzeptionelle Aspekte
- Langzeitsicherheit
- Nachweisverfahren

Entsorgungskonzeptionelle Aspekte: Bedeutsam ist hier der Aspekt „Anfall verschiedener Abfälle in der Zeit“. Aus sicherheitstechnischer Sicht sollten radioaktive Abfälle so bald wie möglich endgelagert werden. Für die großen Mengen an bereits vorhandenen oder in den nächsten Jahren anfallenden Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wäre die baldige Inbetriebnahme eines entsprechenden Endlagers wünschenswert. Ein Endlager für die vergleichsweise geringen Mengen an wärmeentwickelnden Abfällen kann später in Betrieb genommen werden. Eine derartige Entsorgungsstrategie ist beim Ein-Endlager-

Konzept vorstellbar, sofern dabei eine stufenweise Inbetriebnahme möglich ist. Bei einer getrennten Einlagerung in zwei Endlagern könnte nach Beendigung der friedlichen Nutzung der Kernenergie und der Endlagerung der dabei erzeugten wärmeentwickelnden Abfälle das dafür genutzte Endlager gegenüber der Biosphäre abgeschlossen werden, wohingegen das Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung weiterhin betrieben würde. Dies stellt einen sicherheitstechnischen Vorteil dar.

Langzeitsicherheit: Bedeutsam ist hier der Aspekt „Robustheit/Systemverhalten“. Als wesentliche Einflussgrößen hierfür wurden der Wärmeeintrag, die Gasentwicklung und chemische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Abfallprodukten identifiziert. Unter den Aspekten des Wärmeeintrags und der chemischen Wechselwirkungen ist eine strikt getrennte Ablagerung verschiedener Abfallarten geboten. Dies kann sowohl im Rahmen des Ein- als auch des Mehr-Endlager-Konzeptes verwirklicht werden. Im Hinblick auf die Gasentwicklung sind Konsequenzen bereits auf das Auswahlverfahren nicht auszuschließen. In Abhängigkeit vom Ausmaß der Gasentwicklung können für unterschiedliche Abfälle Wirtsgesteine mit unterschiedlicher Permeabilität erforderlich sein. In diesem Fall würde eine Trennung der Abfälle in einem Endlager allein nicht ausreichen, sondern die Abfälle müssten auf zwei oder mehr Endlager in unterschiedlichen Formationen aufgeteilt werden. Bei Verfolgung des Ein-Endlager-Konzeptes sind u.U. sicherheitstechnische Kompromisse zu schließen. Ferner wird die Auswahl an Standorten, die alle Anforderungen optimal erfüllen, bei einem Ein-Endlager-Konzept wahrscheinlich eingeschränkt sein.

Nachweisverfahren: Der Langzeitsicherheitsnachweis ist beim Ein-Endlager-Konzept u.U. schwieriger zu führen. Eine Aufteilung der Abfälle auf zwei oder mehr Endlager bietet wahrscheinlich nachweistechische Vorteile.

Damit ergeben sich folgende **Schlussfolgerungen:**

- **Die räumliche Trennung verschiedener Abfallarten, insbesondere von HAW/BE und LAW/MAW, ist unter Sicherheits- und Nachweisaspekten unerlässlich.**
- **Die räumliche Trennung verschiedener Abfallarten ist beim Ein-Endlager-Konzept mit größeren Anstrengungen verbunden als bei einer Aufteilung der verschiedenen Abfallarten auf z. B. zwei Endlager.**
- **Beim Ein-Endlager-Konzept ist der Langzeitsicherheitsnachweis u.U. schwieriger zu führen als bei einer Aufteilung der Abfälle auf z. B. zwei Endlager.**
- **Wahrscheinlich ist beim Ein-Endlager-Konzept die Identifizierung von günstigen geologischen Gesamtsituationen/Standorten, die alle Anforderungen optimal erfüllen, schwieriger. Wahrscheinlich ist auch die Anzahl entsprechender Regionen/Standorte eingeschränkt, oder es müssen wahrscheinlich Abstriche bei der Sicherheit gemacht werden.**
- **Das Ein-Endlager-Konzept stellt also an die Entwicklung des Suchverfahrens besondere Anforderungen.**

Literatur

- /1/ Aufbruch und Erneuerung – Deutschlands Weg ins 21. Jahrhundert. Koalitionsvereinbarung zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands und Bündnis 90 / Die GRÜNEN, Bonn, 20. Oktober 1998.
- /2/ Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000.
- /3/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: 1. Workshop Wege zur Endlagerung, 15. bis 16. September 2000 in Kassel, Tagungsbericht, S. 37/38.