

**Umgang mit radioaktiven Abfällen
in der Europäischen Union:**
Wachsende Mengen und keine Lösung

Hannover, Oktober 2010

Mit Unterstützung der Grünen/EFA Fraktion im Europäischen Parlament.



Die Grünen | Europäische Freie Allianz
im Europäischen Parlament

Auftraggeber:

Die Grünen/EFA im Europäischen Parlament

Auftragnehmer:

Ing. grad. Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann

intac – Beratung · Konzepte · Gutachten
zu Technik und Umwelt GmbH

Kleine Düwelstraße 21

30 171 Hannover

Tel.: 0511 / 85 30 55

Fax: 0511 / 85 30 62

e-mail: WNeumann@intac-hannover.de

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	5
2. ATOMMÜLL	6
2.1 Atommüll, was ist das?	6
2.2 Wo fällt Atommüll an?	7
2.2.1 Abfallanfall bei Gewinnung und Verarbeitung von Uran	7
2.2.2 Abfallanfall durch Betrieb von Atomkraftwerken	9
2.2.3 Abfallanfall durch Wiederaufarbeitung	10
2.2.4 Abfallanfall aus der Stilllegung von Atomanlagen	11
2.2.5 Abfallanfall beim Umgang mit radioaktiven Abfällen	12
2.3 Klassifizierung radioaktiver Abfälle	12
2.4 Wie gefährlich ist der Atommüll?	13
2.4.1 Gesundheitsgefahren	13
2.4.2 Weitere Gefahren	15
3. WASTE-MANAGEMENT-KONZEPTE	16
3.1 Waste-Management für hochradioaktive Abfälle	17
3.1.1 Umgang mit bestrahlten Brennelementen	17
3.1.2 Endgültige Endlagerung	22
3.1.3 Endlagerung mit Rückholbarkeit	23
3.1.4 Kontrollierte geologische Langzeit-Lagerung	25
3.1.5 Langzeit-Zwischenlagerung	26
3.2 Waste-Management für schwach- und mittelradioaktive Abfälle	27
3.2.1 Endlagerung in tiefen geologischen Formationen	27
3.2.2 Oberflächennahe Endlagerung	28
3.3 Waste-Management für sehr schwachradioaktive Abfälle	29
3.3.1 Freigabe	29
3.3.2 Endlagerung mit geringeren Sicherheitsanforderungen	30
3.4 Fazit zu den Waste-Management-Konzepten	31
4. WASTE-MANAGEMENT IN EU, RF UND USA	32
4.1 Situation und Strategien in EU-Mitgliedsstaaten	33
4.2 Strategien in Russischer Föderation und USA	82
5. ZUSAMMENFASSUNG	87

Abkürzungen

AKW	Atomkraftwerk
BE	Brennelement
HLW	Hochradioaktiver Abfall (high level waste)
ILW	Mittelradioaktiver Abfall (intermediate level waste)
LILW	Schwach- und mittelradioaktiver Abfall (low and intermediate level waste)
LLW	Schwachradioaktiver Abfall (low level waste)
Mg	Megagramm, früher t = Tonne
MOX	Mischoxid (Uran und Plutonium)
SM	Schwermetall, Gehalt von Uran oder Uran und Plutonium in Brennelementen
t	Tonne (Masseneinheit)
VLLW	Sehr schwachradioaktiver Abfall (very low level waste)

1. Einleitung

Der für Energie und damit auch für Fragen im Zusammenhang mit der Atomenergie zuständige EU-Kommissar Öttinger hat angekündigt, im Herbst 2010 einen Vorschlag für eine Richtlinie zum Umgang mit bestrahlten Brennelementen und radioaktiven Abfällen in der Europäischen Union vorzulegen. Als Grundlage für die Diskussion dieses Richtlinienvorschlages werden in dieser Studie die nach gegenwärtigem Stand von Wissenschaft und Technik grundsätzlichen Möglichkeiten zum Umgang mit bestrahlten Brennelementen und radioaktiven Abfällen und die Situation hierzu in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union aufgezeigt.

Im Rahmen der Nutzung von Atomenergie fallen die mit Abstand größten Mengen von radioaktiven Abfällen (Atommüll) bei der Stromerzeugung (und teilweise paralleler Wärmeerzeugung) an. Diesem Bereich ist auch der weitaus größte Teil des Atommülls aus Forschung und Industrie zuzuordnen.

Die in Forschung und Industrie in anderen Anwendungsbereichen der Atomenergie sowie die in der Medizin anfallenden radioaktiven Abfälle haben mengen- und aktivitätsmäßig einen weitaus geringeren Umfang und enthalten keine Kernbrennstoffe. Auf diese radioaktiven Abfälle wird im Folgenden aufgrund der schlechten Informationslage und des insgesamt geringeren Gefahrenpotenzials nicht weiter eingegangen. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass in vielen Anwendungsbereichen in Medizin und Industrie Methoden ohne den Einsatz radioaktiver Stoffe zur Verfügung stehen, durch deren EU-weite Nutzung die radioaktiven Abfälle aus diesen Bereichen deutlich vermindert werden könnten. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben radioaktive Abfälle, die durch die Gewinnung von Bodenschätzen (z.B. Erdöl und Erdgas) als Nebenprodukt anfallen.

Die hier vorgelegte Studie soll als Grundlage für einen allgemein verständlichen Internetauftritt dienen. Es ist deshalb nicht durchgehend im Stil eines Gutachtens bzw. einer Expertise geschrieben. Adressaten des Internetauftritts sind Laien und Fachleute.

In Kapitel 2 dieser Studie erfolgen zunächst allgemeine Aussagen zu radioaktiven Abfällen. Daran schließt sich in Kapitel 3 die Beschreibung von Waste-Management-Optionen an. Die jeweilige Situation im Umgang mit radioaktiven Abfällen wird in Kapitel 4 für die Atomenergie nutzenden EU-Mitgliedsstaaten sowie wegen der be-

sonderen Bedeutung für die Russische Föderation und die USA dargestellt. Kapitel 5 enthält eine Bewertung der Gesamtsituation für die Europäische Union.

2. Atommüll

2.1 Atommüll, was ist das?

Die Nutzung der Atomenergie zur Strom- und auch Wärmeerzeugung bedingt nicht nur den Betrieb von Atomkraftwerken, sondern eine große Zahl von weiteren Anlagen. Es entsteht eine große Menge von Atommüll.

Dieser Atommüll ist radioaktiv, das heißt die Abfälle enthalten Atomkerne, die sich nach einer gewissen Zeit ohne äußeren Einfluss in andere Atomkerne umwandeln (zerfallen). Beim Zerfall geht von den radioaktiven Abfällen eine ionisierende Strahlung aus. Es handelt sich um so genannte α -, β - oder γ -Strahlung, die bei Eindringen in andere Materie Schäden verursacht.

Die Zahl der in den Abfällen enthaltenen radioaktiven Atomkerne ist sehr groß. Pro Sekunde können viele Milliarden Zerfälle von Atomkernen in einem Abfallgebilde stattfinden. Die Einheit, in der die Zerfälle pro Sekunde angegeben werden, ist das Becquerel (Bq). Wie viel Zerfälle in einem bestimmten Abfall zu einem konkreten Zeitpunkt stattfinden hängt davon ab, zu welchen chemischen Elementen diese radioaktiven Atomkerne (Radionuklide genannt) gehören, wie viel der jeweiligen Radionuklidsorte am Anfang im Abfall vorhanden war (Radioaktivitätsinventar) und wie viel Zeit seitdem vergangen ist.

Die Radionuklide in den Abfällen haben verschieden lange Halbwertszeiten. Das bedeutet, wie lange es dauert bis die Hälfte der ursprünglich vorhandenen radioaktiven Atomkerne durch Kernzerfall verschwunden ist, hängt von der Radionuklidsorte ab. Das gilt im Weiteren auch für den Zeitraum, bis die Radioaktivität in den Abfällen auf einen Wert abgeklungen ist, der einen deutlich geringeren Umfang an Schäden bedeutet.

Die Halbwertszeiten reichen für die verschiedenen Radionuklidsorten von Bruchteilen von Sekunden bis zu vielen Millionen Jahren.

Neben dem radiologischen Gefahrenpotenzial beinhaltet ein Teil der Abfälle auch chemisch giftige Inhaltsstoffe. Dies darf vor allem im Hinblick auf Grund- und Oberflächenwasserverunreinigungen nicht vernachlässigt werden.

2.2 Wo fällt Atommüll an?

Die Entstehung von Atommüll durch die Nutzung der Atomenergie zur Stromerzeugung kann in fünf große Bereiche eingeteilt werden. Atommüll wird verursacht durch:

- Gewinnung und Verarbeitung von Uran,
- Betrieb von Atomkraftwerken,
- Wiederaufarbeitung,
- Stilllegung von Atomanlagen und
- Umgang mit radioaktiven Abfällen.

2.2.1 Abfallanfall bei Gewinnung und Verarbeitung von Uran

Grundlage für die heutige Atomenergienutzung ist die Spaltung von bestimmten Uranatomkernen. Uran ist ein radioaktiver Stoff, der natürlicherweise in der Erdkruste vorhanden ist. In einigen Bereichen auf der Erde tritt das Uran konzentrierter auf, dort wird es als Erz in Bergwerken abgebaut und das Erz zu Uranoxid (Yellow Cake) aufbereitet. Der beim Abbau entstehende Abraum und die bei der Aufbereitung anfallenden Schlämme sind die ersten anfallenden Atommüllarten.

Das in Abraum und Schlämmen verbleibende Resturan und beim Abbau frei werdende andere Substanzen und Gase sind für Menschen gefährlicher als wenn sie in der Erdkruste fest gebunden geblieben wären. Die Radionuklidkonzentration in diesen Abfällen ist zwar relativ gering, durch die großen Massen von einigen hunderttausend Tonnen (bzw. Megagramm), die an den entsprechenden Standorten anfallen, wird aber doch ein hohes Radioaktivitätsinventar zugänglich gemacht. Der Abraum türmt sich zu riesigen Bergen auf der Erdoberfläche. Beim Umgang mit dem Abraum sowie durch Erosion bei der Lagerung wird Staub verursacht, den Menschen einatmen. Die Schlämme werden in riesige Becken gepumpt und dort dauerhaft abgelagert. Von dort kann Uran ins Grundwasser gelangen. Von diesen Problemen mit vielen Millionen Tonnen radioaktiver Abfälle bleibt die Europäische Union seit

längerer Zeit weitgehend unberührt, da das Uran – von sehr geringen Mengen in der Tschechischen Republik und Rumänien abgesehen – heutzutage in weit entfernten anderen Staaten abgebaut wird. In einigen EU-Mitgliedstaaten gab es Uranerzabbau in relativ geringem Umfang, der inzwischen weitgehend eingestellt ist. Zum Beispiel wurde in Frankreich in zahlreichen kleineren Minen Uran abgebaut. Die Sanierung ist zur Zeit Gegenstand von Beratungen und Konzeptdiskussionen. In der ehemaligen DDR wurden früher größere Mengen Uran abgebaut. Die dortige Hinterlassenschaft ist inzwischen saniert. Die Bevölkerung muss auf Dauer mit höheren Strahlenbelastungen aus der Umgebung leben.

Aus dem aufbereiteten Uranoxid werden dann in mehreren Bearbeitungsstufen (Konversion, Anreicherung, Kalzinierung) in verschiedenen Anlagen aus dem Uran die Brennelemente zum Einsatz in den Atomkraftwerken fabriziert. Eine oder mehrere dieser Anlagen gibt es in folgenden Mitgliedsstaaten der Europäischen Union: Belgien, Frankreich, Großbritannien, Deutschland, Niederlande, Rumänien, Schweden und Spanien. In jeder dieser Anlagen fallen uranhaltige Abfälle an.

Im Hinblick auf die Menge radioaktiven Abfalls und des Gefahrenpotenzials sind von den Urananlagen in der EU die Urananreicherungsanlagen in Capenhurst (GB), Almelo (Niederlande), Gronau (Deutschland) und Tricastin (Frankreich) besonders beachtenswert. In ihnen fallen neben dem weiter verwendeten angereicherten Uran große Mengen abgereichertes Uran an. Dieses Uran wird in der chemischen Verbindung Uranhexafluorid (UF_6) gelagert, die nicht nur radioaktiv, sondern auch sehr giftig ist. Durch seine Eigenschaften kann UF_6 im Falle einer Freisetzung in der näheren Umgebung katastrophale Folgen verursachen.

Unter den wirtschaftlichen Randbedingungen westlicher Staaten kann das abgereicherte UF_6 nicht weiter verwendet und müsste deshalb als Abfall deklariert werden. In der Vergangenheit wurde von den Betreibern in Frankreich, Deutschland und den Niederlanden die Möglichkeit genutzt, das abgereicherte UF_6 nach Russland zu bringen³ (jährlich weit mehr als 10.000 tU). Dort wurde ohne Berücksichtigung der realen Kosten wiederangereichert und der kleine wiederangereicherte Teil des gelieferten Urans an die europäischen Absender zurück geschickt. Der große Teil des nun noch weiter abgereicherten UF_6 blieb in Russland und wird dort unter freiem Himmel für eine unbestimmte Zeit zwischengelagert. Was damit auf lange Sicht passieren soll ist nicht bekannt. Die Unternehmen aus der Europäischen Union haben die Verantwortung dafür den Betreibern der russischen Anlagen überlassen.

Die Verträge für diese Wiederanreicherung sind inzwischen ausgelaufen. Nun müssen die Betreiber der Anreicherungsanlagen in der EU das abgereicherte UF_6 behalten. Aus Almelo und Gronau wird es nach Süd-Frankreich transportiert, dort – wie das französische UF_6 – in eine weniger gefährliche Form (Uranoxid) umgewandelt und dann zum Absender zurück transportiert. Dort wird zwischengelagert. Das französische Uranoxid wird nach Bessines (nahe Limoges) zur Zwischenlagerung transportiert und das britische abgereicherte Uran aus Capenhurst wird am Standort gelagert. Nach momentanem Stand muss das abgereicherte Uran irgendwann als Abfall deklariert werden. Ein Konzept für den weiteren Umgang wurde bisher in keinem der vier EU-Mitgliedsstaaten vorgelegt. Es wird sich um einige 100.000 t Abfälle handeln.

2.2.2 Abfallanfall durch Betrieb von Atomkraftwerken

Beim Einsatz des Urans als Kernbrennstoff im Reaktor eines Atomkraftwerkes finden durch Spaltung von Atomkernen und Teilcheneinfang verschiedene Prozesse der Kernumwandlung statt, bei denen Atomkerne bestimmter chemischer Elemente (Radionuklide) produziert werden, die radioaktiv sind.

Ein Teil der Radionuklide wird durch die Kernspaltung direkt verursacht, die sogenannten Spaltprodukte. Diese bilden sich in großer Zahl in den Brennelementen. Die Brennelemente sind nach einer gewissen Einsatzzeit im Reaktor und der damit verbundenen Bestrahlung „verbraucht“. Sofern sie nicht wiederaufgearbeitet werden (siehe Abschnitt 2.2.3), müssen sie als radioaktiver Abfall behandelt werden. Es handelt sich um die gefährlichsten der durch die Atomenergienutzung entstehenden Abfälle.

Infolge der Kernspaltung und der dabei auftretenden Direktstrahlung werden im Atomkraftwerk durch Kontamination (Verunreinigung von Flüssigkeiten oder festen Oberflächen mit radioaktiven Stoffen) und Aktivierung (Umwandlung von Atomkernen in festen Stoffen) sowie durch Kontaminationen bei Kontroll- und Instandhaltungsarbeiten weitere Arten radioaktiver Abfälle produziert. Radioaktive flüssige Abfälle sind zum Beispiel Öle, Schlämme, Verdampferkonzentrate (Kühlwasserverunreinigung), Ionentauscherharze (Kühlkreislaufreinigung) und Filterhilfsmittel. Zu den anfallenden festen radioaktiven Abfällen gehören Metallteile, Isoliermaterial, Papier, Kunststoffe, Textilien, Werkzeuge, Bauschutt und Strukturteile.

Wieviel Abfälle produziert werden hängt vom Reaktortyp und vom Alter des Reaktors ab. In den neueren Reaktoren in der Bundesrepublik Deutschland fallen zum Beispiel jährlich durchschnittlich pro Reaktor und Jahr etwa 50 m³ konditionierte Abfälle¹ an. In Deutschland werden wegen des Kostendrucks und den existierenden Sicherheitsanforderungen relativ effiziente Konditionierungsmethoden eingesetzt. Das ist in vielen anderen Staaten nicht der Fall. Deshalb sind die Atommüllvolumina in anderen EU-Mitgliedsstaaten zum Teil erheblich größer. In Frankreich betragen sie zum Beispiel etwa 78 m³ und in anderen Ländern noch mehr.

In den genannten Volumina sind die bei größeren Reparatur- oder Nachrüstmaßnahmen anfallenden Abfälle nicht enthalten.

2.2.3 Abfallanfall durch Wiederaufarbeitung

In einigen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union enthält bzw. enthielt das Waste-Management-Konzept die so genannte Wiederaufarbeitung der bestrahlten Brennelemente (siehe Kapitel 3). Die Brennelemente werden dabei zerlegt, zerschnitten und in Säure gelöst. Aus der Lösung werden Uran und das im Reaktor entstandene Plutonium abgetrennt und zur eventuellen oder tatsächlichen Weiterverwendung zwischengelagert.

Die verbleibende Lösung enthält die durch die Kernspaltung im Reaktor entstandenen radioaktiven Spaltprodukte und die durch Teilcheneinfang im Reaktor entstandenen sehr langlebigen Radionuklide (z.B. Curium, Neptunium), aber auch Reste von Uran und Plutonium. Sie ist hochradioaktiv (HAW). In einem Schmelzofen wird sie mit anderen Stoffkomponenten zu einer Glasschmelze vermischt, in Stahlkokillen abgegossen und abgekühlt. Die so entstandenen HAW-Kokillen werden dann in einem Lager am Standort der Wiederaufarbeitungsanlage oder in einer Lagerhalle des AKW-Betreibers aus dem die Brennelemente gekommen sind, zwischengelagert. Das Gefahrenpotenzial der HAW-Kokillen ist mit dem der bestrahlten Brennelemente vergleichbar.

Neben diesen hochradioaktiven Abfällen entstehen noch die Abfallarten der zerschnittenen Hülsen und Strukturteile der Brennelemente, der Schlämme aus Rückständen in sowie der Flüssigkeiten aus der Reinigung von Komponenten, die be-

¹ M. Volkmer: „Kernenergie Basiswissen“; Broschüre des Informationskreis KernEnergie, Juni 2007

trieblich anfallenden festen Abfälle und die kontaminierten Komponenten und Rohrleitungssysteme.

Die entstandenen Abfallarten werden an den Standorten der Wiederaufarbeitungsanlagen in unterschiedlicher Art und Weise konditioniert und zwischengelagert. Abfälle, die durch die Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente aus ausländischen Atomkraftwerken verursacht wurden, werden entweder in der konditionierten Form oder in äquivalenten Mengen hochradioaktiver Abfälle nach einem gewissen Zeitraum in den jeweiligen Herkunftsstaat zur weiteren Zwischenlagerung gebracht.

In der EU werden gegenwärtig noch Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich (La Hague) und Großbritannien (Sellafield) betrieben.

2.2.4 Abfallanfall aus der Stilllegung von Atomanlagen

Alle Atomanlagen, von der Uranverarbeitungsanlage über das Atomkraftwerk bis zu Wiederaufarbeitungsanlagen, Konditionierungsanlagen und Endlager, müssen nach einer gewissen Betriebszeit stillgelegt werden. Nach internationalem Stand beinhaltet dies den zügigen (das heißt bei Atomkraftwerken etwa 15 Jahre) Abriss der Anlagen. In einigen Staaten werden Atomkraftwerke jedoch zunächst für einen Zeitraum von 30 bis 60 Jahren versiegelt stehen gelassen und erst nach einem Teilabklingen der in und an den Einbauten und Bauwerkstrukturen befindlichen radioaktiven Stoffe abgerissen.

Bei der Stilllegung von Atomanlagen fallen sehr große Mengen radioaktiver Abfälle an. Bei einem Atomkraftwerk sind dies etwa 6.000 t radioaktive Abfälle bei einem Gesamtanfall von etwa 500.000 t Abfällen. Bei den radioaktiven Abfällen handelt es sich hauptsächlich um Bauschutt und Metallteile.

2.2.5 Abfallanfall beim Umgang mit radioaktiven Abfällen

Die radioaktiven Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung von Atomanlagen müssen konditioniert, zwischen- und endgelagert werden. Auch in den hierfür eingerichteten Atomanlagen fallen beim Betrieb und bei der Stilllegung radioaktive Abfälle an. Bei den Zwischen- und Endlagern sollten bei ordnungsgemäßem Betrieb nur wenig Kontaminationen und keine Aktivierung auftreten. Etwas größer ist er in Behandlungs- bzw. Konditionierungsanlagen für radioaktive Abfälle. Hier werden auch Anlagenteile kontaminiert, die später als radioaktiver Abfall behandelt werden müs-

sen. Insgesamt ist die Menge der in diesen Anlagen anfallenden Abfälle im Vergleich zu Urangewinnung, dem Betrieb von Atomkraftwerken und Wiederaufarbeitung gering.

2.3 Klassifizierung radioaktiver Abfälle

Die Einteilung radioaktiver Abfälle ist in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union unterschiedlich. Dafür verwendete Kriterien sind zum Beispiel die Aktivitätskonzentration, die Gesamtradioaktivität eines Gebindes, die Herkunft oder die Wärmeentwicklung der Abfälle. Die Kommission der Europäischen Union hat zur Harmonisierung der Klassifizierung innerhalb der EU eine Empfehlung für ein Klassifizierungssystem für feste radioaktive Abfälle herausgegeben². Dieses System wurde in den Mitgliedsstaaten bisher nicht als bindend eingeführt. Es entspricht aber im Wesentlichen der Einteilung in vielen Mitgliedsstaaten und ist in folgende Kategorien eingeteilt:

- ◆ „Radioaktive Abfälle in der Übergangsphase“ (VLLW)
Abfälle die unmittelbar beim Anfall oder nach einer gewissen Zwischenlagerzeit durch Abklingen Radioaktivitätswerte besitzen, die festgelegte Freigabewerte unterschreiten. Diese Abfälle dürfen – trotz ihres immer noch vorhandenen Radioaktivitätsinventars – konventionell beseitigt werden. Diese radioaktiven Abfälle werden auch sehr schwach oder geringfügig radioaktiv genannt. Zu diesen Abfällen gehören zum Beispiel Bauschutt und dekontaminierte Metallteile aus der Stilllegung, aber auch gering radioaktive Betriebsabfälle aus Atomanlagen sowie ein Teil der uranhaltigen Abfälle.
- ◆ „Schwach- und mittelaktive Abfälle“ (LLW und ILW)
Abfälle bei der die durch das Radioaktivitätsinventar verursachte Wärmeentwicklung unkritisch für die Endlagerung ist. Die zulässige Wärmeentwicklung wird standortspezifisch festgelegt. Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle werden weiter unterteilt:

² Empfehlung der Kommission vom 15. September 1999 für ein Klassifizierungssystem für feste radioaktive Abfälle, (1999/669/EG, Euratom), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 265, vom 13. Oktober 1999

- „Kurzlebige Abfälle“
Abfälle mit Halbwertszeiten der hauptsächlich enthaltenen Radionuklide von weniger als 30 Jahren und einer begrenzten Konzentration von langlebigen α -Strahlern (400 Bq/g in der betroffenen Abfallmenge).
- „Langlebige Abfälle“
Alle nicht kurzlebigen Abfälle.

Zu den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen gehören die in Kapitel 2.2 genannten Abfälle.

- ◆ „Hochaktive Abfälle“ (HLW)
Abfälle deren Radioaktivitätsinventar so hoch ist, dass über die gesamte Zwischenlagerzeit hinaus und auch nach Einlagerung in ein Endlager von relevanter Wärmeentwicklung auszugehen ist.
Zu diesen Abfällen gehören zum Beispiel bestrahlte Brennelemente und HAW-Kokillen.

2.4 Wie gefährlich ist der Atommüll?

2.4.1 Gesundheitsgefahren

Die radioaktiven Stoffe in den Atomabfällen senden beim Zerfall eine ionisierende Strahlung aus. Ionisierend heißt, dass sich bei Durchstrahlung von Materie die Verteilung der elektrischen Ladung verändert. Solche Ladungsveränderungen führen in organischem Gewebe zu chemischen Reaktionen, durch die Zellen verändert oder abgetötet werden. Mit der Zahl dieser Vorgänge im menschlichen Körper steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Schäden auftreten, die der menschliche Organismus nicht mehr beherrschen kann.

Die schlimmsten Folgen sind Krebserkrankungen oder genetische Veränderungen, die sich in der nächsten oder einer späteren Generation durch Missbildungen der Kinder auswirken. Aber auch Stoffwechselkrankheiten oder Schwächung des Immunsystems können die Folge sein.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Erkrankung hängt von der Höhe der Radioaktivität ab und von der Dauer, die der Mensch der Strahlung ausgesetzt ist. Grundsätzlich können deshalb alle radioaktiven Abfallarten, von sehr gering bis

hochradioaktiv, Auslöser von Gesundheitsschäden sein. Bei hochradioaktiven Abfällen ist aber die Wahrscheinlichkeit größer.

Es gibt drei Pfade, über die die Radioaktivität für den Menschen gefährlich wird:

- ◆ Durch Aufenthalt in unmittelbarer Nähe der Abfälle wird der Körper einer Direktstrahlung (Gamma- oder Neutronenstrahlung) ausgesetzt.
- ◆ Durch Aufenthalt in oder in der Nähe von Anlagen, in denen mit radioaktiven Abfällen umgegangen wird, können aus den Abfällen freigesetzte Radionuklide durch atmen direkt und (z.B. nach Ablagerung von freigesetzten Radionukliden auf Pflanzen bzw. in Wasser) durch Nahrungsaufnahme indirekt in den Körper gelangen.
- ◆ Durch Berühren von radioaktiven Abfällen oder Abfallgebinden kann die Haut kontaminiert werden.

Alle drei Pfade sind für das Betriebspersonal in Atomanlagen relevant. Für Personen aus der Bevölkerung hat der dritte Pfad in der Regel keine Relevanz.

Der Pfad Direktstrahlung ist für Personen aus der Bevölkerung relevant, die in der Nähe einer häufig benutzten Transportstrecke für radioaktive Abfälle wohnen bzw. sich dort aufhalten oder die sich am Anlagenzaun einer Atomanlage mit hoher Direktstrahlung (Ortsdosisleistung), z.B. Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle, aufhalten. Der Pfad Aufnahme von radioaktiven Stoffen in den Körper ist vor allem für Anwohner von Atomanlagen relevant, in denen mit den Abfällen direkt umgegangen wird, z.B. Wiederaufarbeitungs- und Konditionierungsanlagen.

Das Risiko von Gesundheitsschäden erhöht sich drastisch, wenn die radioaktiven Abfälle von Stör- oder Unfällen in den Atomanlagen oder von schweren Unfällen während des Transportes betroffen sind. Die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kann einen erheblichen Umfang annehmen. Dies gilt insbesondere auch für gezielte Sabotageaktionen.

Die vorstehend betrachtete Gesundheitsgefährdung bezieht sich auf den Zeitraum, solange mit den radioaktiven Abfällen umgegangen wird; also einige zehner Jahre. Doch auch wenn die radioaktiven Abfälle nicht mehr gehandhabt werden müssen, sie also endgelagert sind, gehen erhebliche Gefahren von ihnen aus. Selbst die Endlagerung in tiefen geologischen Schichten bietet durch die zum Teil sehr langen Halbwertszeiten keine Gewähr, dass die Radionuklide von der Biosphäre und damit auf Dauer vom Menschen isoliert bleiben.

Im Endlager kommt es über die langen Zeiträume zu Reaktionen, die eine Freisetzung begünstigen. Verhält sich das die Abfälle umgebende Gestein bzw. die Geologie am Standort insgesamt nicht so wie vorhergesagt, können sich Radionuklide in der Geosphäre ausbreiten und gelangen zum Beispiel über die Grundwasserleiter in die Biosphäre. Dadurch können oberflächennahes Grundwasser und Oberflächengewässer und damit auch Trinkwasser radiologisch verseucht werden.

2.4.2 Weitere Gefahren

Missbrauch

Vorstehend wurden die Gefahren für Menschen betrachtet, die von den radioaktiven Abfällen selbst ausgehen. Möglich ist aber auch ein Missbrauch von radioaktiven Abfällen.

Die bestrahlten Brennelemente enthalten Kernbrennstoffe, insbesondere auch Plutonium. Nach einer Abtrennung aus den Brennelementen können die Kernbrennstoffe auch in einer Atombombe eingesetzt werden.

In der internationalen Diskussion wird vor allem im Rahmen der Internationalen Atomenergie Organisation (IAEO) auf die Möglichkeit hingewiesen, dass Terrorgruppen eine Ausbreitung bzw. Verseuchung mit radioaktiven Stoffen auch mit konventionellen Sprengsätzen beabsichtigen könnten (dirty bomb). Hierfür würden sich auch radioaktive Abfälle eignen.

Andere Schutzgüter

Vor den nachteiligen Auswirkungen der Radioaktivität muss nicht nur der Mensch, sondern auch die Umwelt, also Tiere und Pflanzen, Wasser, Boden und Luft geschützt werden.

Tiere und Pflanzen sind auch lebende Organismen, in denen ionisierende Strahlung Schäden verursacht. Wasser, Boden und Luft dürfen nicht verunreinigt werden.

3. Waste-Management-Konzepte

Durch die Nutzung der Atomenergie entstehen Abfälle, die aufgrund der langen Halbwertszeiten von in ihnen enthaltenen Stoffen auch nach mehreren 100.000 Jahren eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Für die Verringerung dieser Gefahr gibt es zwei fundamentale Möglichkeiten im Umgang mit den radioaktiven Abfällen und ihrem Verbleib, nämlich das Verdünnungsprinzip und das Konzentrationsprinzip.

Beim **Verdünnungsprinzip** soll eine so weitgehende Auflösung und Verteilung der Abfälle bzw. ihres radioaktiven Inhalts in die Umwelt (z.B. Wasser, Luft) erfolgen, dass Schutzgüter nicht unzulässig beeinträchtigt werden. Zu Beginn der Atomenergienutzung wurde dieses Prinzip von vielen Staaten verfolgt. Schwach- und mittelradioaktive Abfälle wurden im Meer versenkt. Diese Praxis wurde aufgrund immer stärker aufkommender Bedenken im Rahmen der Londoner Konvention zum Schutz des Meeres 1983 verboten. Zur Versenkung hochradioaktiver Stoffe war es bis dahin wahrscheinlich nicht gekommen.

Für gas- und aerosolförmige radioaktive Abfälle wird seit Beginn der Atomenergienutzung bis heute teilweise das Verdünnungsprinzip angewendet. Soweit überhaupt möglich werden diese Stoffe nur so weit durch Filter oder andere Maßnahmen in den Atomanlagen zurückgehalten, dass mit der freigesetzten Radionuklidmenge durch die Verdünnung in der Umgebungsluft festgelegte Belastungsgrenzwerte für den Menschen eingehalten werden. Nach herrschender Meinung soll eine Erkrankung von Anwohnern durch diese Belastung unwahrscheinlich sein.

In den letzten zehn bis fünfzehn Jahren wurde in einigen EU-Mitgliedsstaaten zur Nutzung des Verdünnungsprinzips eine neue Kategorie von Abfällen eingeführt, die sehr schwachradioaktiven Abfälle. Diese Abfälle werden nach mehr oder weniger wirksamen Radioaktivitätskontrollen aus der Behandlung nach Atomrecht in der Annahme entlassen, dass sie durch Einbringen in den konventionellen Stoffkreislauf verdünnt werden und dadurch keine nachteiligen Beeinflussungen von Mensch und Umwelt auftreten können.

Das **Konzentrationsprinzip** bedeutet, dass die Abfälle bzw. die in ihnen enthaltenen radioaktiven Stoffe konzentriert und gegenüber der Umwelt isoliert werden. Für feste

und flüssige schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle sowie einen Teil der gas- und aerosolförmigen Abfälle wird dieses Prinzip heute weltweit verfolgt.

Im Folgenden werden die grundlegenden Waste-Management-Konzepte mit Hinweisen auf Varianten kurz beschrieben und die Vor- bzw. Nachteile gegenüber den anderen Konzepten benannt.

3.1 Waste-Management für hochradioaktive Abfälle

Weltweit gibt es bisher kein umgesetztes Konzept für das gesamte Waste-Management bei hochradioaktiven Abfällen. Gegenwärtig werden in den EU-Mitgliedsstaaten, die Atomenergie nutzen, verschiedene Waste-Management-Optionen diskutiert bzw. entwickelt. In einigen Staaten wurde mit der Umsetzung eines entwickelten Konzeptes begonnen. Die drei wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der Waste-Management-Konzepte sind:

- ◆ Brennelemente auflösen oder Brennelemente unversehrt lassen.
- ◆ Lagerung in tiefen geologischen Schichten oder Lagerung an der Erdoberfläche.
- ◆ Endgültige Lagerung oder Lagerung bis neue Entsorgungsoptionen erforscht und entwickelt sind.

3.1.1 Umgang mit bestrahlten Brennelementen

Zum Umgang mit bestrahlten Brennelementen gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten, entweder die bestrahlten Brennelemente bleiben im Wesentlichen erhalten oder die Brennelemente werden zerschnitten und die enthaltenen Radionuklidarten werden zum Teil abgetrennt.

Direkte Endlagerung

Das Konzept mit der endgültigen Verbringung unversehrter Brennelemente wird auch Direkte Endlagerung genannt. Die bestrahlten Brennelemente werden nach ihrer Entladung aus dem Reaktor zunächst zwischengelagert. Diese Zwischenlagerung erfolgt entweder in Nasslagern (also in Wasser) oder in Trockenlagern (in Gasatmosphäre). Bei Kenntnis der Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung werden die Brennelemente konditioniert. Der Zeitpunkt dieser Konditionierung wird in der Regel mehr oder weniger kurz vor der Einlagerung in ein Endlager sein. Der

Umfang der Konditionierungsmaßnahmen wird von den Anforderungen des Endlagers abhängig sein. Im einfachsten Fall kann es lediglich eine Umladung in einen langzeitstabilen Behälter geben.

Vorteile:

- Es sind keine chemischen Großanlagen zur Abtrennung von Radionukliden erforderlich, deren Betrieb mit Freisetzungen radioaktiver Stoffe in Wasser und Luft sowie einem hohen Störfallrisiko verbunden ist.
- Es werden keine zusätzlichen radioaktiven Abfallströme erzeugt.
- Die Kernbrennstoffe bleiben in der Brennstoffmatrix eingebunden und ein Zugriff für Missbrauch ist durch die langfristige hohe Radioaktivität deutlich erschwert.
- Die Zahl von Transporten ist geringer.

Nachteile:

- Es sind alle langlebigen Radionuklide im Abfall, deshalb muss für die geologische Endlagerung ein Langzeitsicherheitsnachweis über mindestens 1 Million Jahre geführt werden.

Wiederaufarbeitung

Die Option mit Abtrennung der Kernbrennstoffe (Uran und Plutonium) aus den Brennelementen wird als Wiederaufarbeitung bezeichnet. Durch diesen Namen wird das Hauptziel deutlich, nämlich das Verfügbarmachen von Kernbrennstoffen für eine erneute Verwendung. Es handelt sich um einen technisch komplizierten und chemisch komplexen Prozess.

Die Brennelemente werden nach der Entladung aus dem Reaktor für eine bestimmte Zeit vor allem in Nasslagern zwischengelagert. Ist das Aktivitätsinventar bestimmter Radionuklide auf den für die Wiederaufarbeitungsanlage relevanten Wert abgeklungen, werden die Brennelemente in diese Anlage transportiert, dort zerlegt, die Brennstäbe zerschnitten und die Abschnitte in Säure gelöst. Aus der Lösung werden Uran und Plutonium zunächst gemeinsam abgetrennt.

Uran und Plutonium werden dann voneinander getrennt und weiter behandelt. Als Oxid sollte das Uran ursprünglich mit dem Plutonium vermischt und für die Herstellung neuer Brennelemente (Mischoxid- oder MOX-Brennelemente) benutzt werden.

Tatsächlich wird es anderweitig verwertet oder zwischengelagert. Es ist zurzeit zweifelhaft, ob tatsächlich das ganze wiederaufgearbeitete Uran einer Nutzung zugeführt werden kann. Das Plutonium wird für neue Brennelemente benutzt, die wieder in Leichtwasserreaktoren eingesetzt werden. Bisher ist nicht großtechnisch erprobt, ob auch Mischoxidbrennelemente in beliebiger Menge beliebig oft wiederaufgearbeitet werden können. Es ist davon auszugehen, dass auch bestrahlte MOX-Brennelemente endgelagert werden müssen.

Die bei dieser Wiederaufarbeitung entstehenden Abfälle sind in Kapitel 2.2.3 beschrieben.

Vorteil

- Die für die Langzeitsicherheit von geologischen Endlagern zu berücksichtigenden Radionuklide von Uran und Plutonium werden zumindest weitgehend entfernt. Es verbleiben aber andere langlebige Radionuklide.

Nachteile

- Die Strahlenbelastungen von Atomanlagenpersonal und Bevölkerung sind integral deutlich höher als bei einer Direkten Endlagerung.
- Die bestrahlten Kernbrennstoffe und die im Reaktor erzeugten Radionuklide werden auch nach dem Trennprozess längere Zeit in gelöster Form gelagert. Bei Stör- bzw. Unfällen können die radioaktiven Stoffe unmittelbar in großen Mengen freigesetzt werden. Die Folgen können größer als durch die Katastrophe in Tschernobyl sein.
- Es entsteht eine Vielzahl von Abfallströmen, die in unterschiedlichen Atomanlagen aufwendig behandelt, zwischengelagert und später endgelagert werden müssen.
- Das Abfallvolumen wird insgesamt vergrößert.
- Die Zahl von Handhabungen und Transporten ist um ein Vielfaches höher als beim ausschließlichen Umgang mit Brennelementen. Damit steigt das Risiko für Stör- bzw. Unfälle.

- Trotz der Entlastung des Langzeitsicherheitsnachweises durch die teilweise Entfernung von Uran und Plutonium, muss er wegen anderer langlebiger Radionuklide für eine Million Jahre geführt werden.
- Die Abtrennung vor allem des Plutoniums ermöglicht einen wesentlich leichteren Zugriff und eine schnellere Nutzung als Atombombenmaterial.
- Der Einsatz von MOX-Brennstoff führt insgesamt zu einer verringerten Sicherheitsmarge bei dem Betrieb der betroffenen Atomkraftwerke.

Abtrennung und Umwandlung

Abtrennung und Umwandlung (Partitioning and Transmutation, P&T) ist ein Waste-Management-Konzept, das auf absehbare Zeit nur theoretisch funktioniert. Es befindet sich in der Entwicklung, die in der Europäischen Union fast ausschließlich aus Steuergeldern finanziert wird. Ziel von P&T ist die Abtrennung langlebiger Radionuklide aus dem bestrahlten Kernbrennstoff und deren kerntechnische Umwandlung (Transmutation) in stabile Atomkerne oder kurzlebige Radionuklide. Dadurch sollen die Sicherheitsanforderungen in Bezug auf einen Langzeitsicherheitsnachweis für die Endlagerung verringert werden können.

Voraussetzung für die Möglichkeit der Transmutation ist die sortenreine Isolierung der umzuwandelnden Radionuklide. Beim P&T-Konzept müssen die Brennelemente deshalb – wie bei der Wiederaufarbeitung – zunächst zerlegt und zerschnitten und dann die enthaltenen bestrahlten Kernbrennstoffe in Lösung gebracht werden. In mehreren Bearbeitungsschritten mit unterschiedlichen Methoden werden langlebige Radionuklide abgetrennt, zu Beginn Uran und Plutonium zusammen, dann die folgenden Radionuklidsorten einzeln. Nach gegenwärtigem Wissensstand ist nicht klar, ob für alle relevanten Radionuklide ein ausreichender Abtrennungsgrad zur nachhaltigen Entlastung des Langzeitsicherheitsnachweises erreicht werden kann.

Die abgetrennten Radionuklide müssen zu Brennelementen oder Targets verarbeitet und dann zur Transmutation in Reaktoren oder Beschleunigern eingesetzt werden. Die Transmutation erfolgt über Kernspaltungen bzw. -umwandlungen durch Neutronenbeschuss. Es gibt drei Transmutationstechnologien, mit denen nach gegenwärtigem Stand von Wissenschaft und Technik aber jeweils nicht alle relevanten Radionuklide umgewandelt werden können.

Transmutation kann in Leichtwasserreaktoren oder Schnellen Reaktoren in kritischer Anordnung oder in beschleunigergesteuerten unterkritischen Reaktoren durchgeführt werden. Bei Anwendung der Technologie mit Leichtwasserreaktoren müsste die heutige Betriebsweise verändert werden, wofür aber noch sicherheitstechnische Probleme gelöst werden müssten. Auf jeden Fall wäre eine mehrfache Rezyklierung (Abtrennung, Targetherstellung, Wiedereinsatz) der Radionuklidtargets erforderlich. Für die Technologie mit Schnellen Reaktoren müssten die heutige – ohnehin schon schlecht funktionierende – Schnelle Brüter Technologie weiter entwickelt werden. Auch hier ist Rezyklierung erforderlich. Die Umsetzung der Schnellen Reaktorkonzepte steckt noch in den Anfängen. Die beschleunigergesteuerte Technologie ist ebenfalls in einem relativ frühen Entwicklungsstadium. Es sind noch viele sicherheitstechnische Fragen zu klären. Rezyklierung ist auch hier unumgänglich.

Nach gegenwärtigem Stand der Entwicklungen ist eine Kombination von mindestens zwei Technologien erforderlich. Ob eine für die nachhaltige Entlastung des Langzeitsicherheitsnachweises ausreichend hohe Transmutationsrate erreicht werden kann, ist für alle drei Technologien fraglich.

Die P&T-Option ist nur auf zentraler Ebene, das heißt EU-weit mit zentralen großen Abtrennungsanlagen und Transmutationsreaktoren denkbar.

Vorteile

- Sofern die Abtrennung der endlagerrelevanten Radionuklide sowie die Transmutation der abgetrennten Radionuklide in ausreichend hohem Umfang gelingt, kann der Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager auf den Zeitraum von einigen Tausend Jahren beschränkt werden.
- Einige der abgetrennten Radionuklidsorten können eventuell einer Nutzung zugeführt werden.

Nachteile

- Alle für die Wiederaufarbeitung genannten Nachteile treffen für P&T in verstärktem Umfang zu.
- Es sind Investitionen für Forschung und Entwicklung im zweistelligen Milliarden-Euro-Bereich erforderlich.

-
- Die groß angelegte Umsetzung der P&T Option würde Jahrzehnte dauern und dennoch nicht allen hochaktiven Atommüll betreffen. Vor allem bereits existierender hoch aktiver Müll aus der Wiederaufarbeitung müsste dennoch anders verbracht werden.

3.1.2 Endgültige Endlagerung

Die Bezeichnung „endgültige“ Endlagerung bezieht sich auf die Absicht, das Endlager nach Einlagerung der Abfälle (im Wesentlichen bestrahlte Brennelemente und/oder HAW-Kokillen) möglichst schnell durch Verfüllung in einen Zustand der passiven Sicherheit zu überführen. Nach der Verfüllung sind weder Wartung noch Kontrolle vorgesehen. Auch eine Rückholbarkeit wird nicht angestrebt.

Die Endlagerung soll in tiefen geologischen Formationen erfolgen. Das Konzept geht von der Lagerung in einem Bergwerk aus. Grundsätzlich möglich wären aber auch Kavernen oder tiefe Bohrlöcher.

Der Schutz von Mensch und Umwelt soll durch die geologische Barriere (Wirts- und umgebendes Gestein) und zusätzlich durch geotechnische (Verfüllmaterial, Schachtverschluss) und technische (Abfallmatrix, Behälter) Barrieren erreicht werden. Wie groß der Schutzanteil der einzelnen Barrieren ist, hängt vom Wirtsgestein ab. Beispielsweise haben bei Hartgesteinen die technischen Barrieren eine Hauptfunktion, während bei Salz der entscheidende Schutz durch die geologische Barriere sichergestellt werden soll.

Vorteile

- Es ist (mit einigen Unsicherheiten) möglich eine langfristige Prognose zur Entwicklung der Umgebung (Geologie) von den radioaktiven Abfällen zu erstellen.
- Die Isolation der Abfälle von Mensch und Umwelt soll nach Verschluss des Endlagers durch ein passiv wirkendes Barrierensystem sichergestellt werden. Es sind keine aktiven technischen Sicherheitseinrichtungen erforderlich.
- Die Sicherheit des Endlagers soll durch die geologische Barriere auch dann gegeben sein, wenn die Kenntnisse über das Endlager teilweise oder vollständig verloren gehen. Voraussetzung hierfür ist allerdings die Wahl eines geeigneten Standortes.

- Die Wahrscheinlichkeit von betrieblichen Störfällen und die Strahlenbelastungen durch den Betrieb sind auf die Einlagerungsphase beschränkt.
- Die Auswirkungen möglicher Einflüsse von außen (z.B. Erdbeben, Wetter, Terroranschläge) sind gering.
- Folgende Generationen werden nicht mit dem Umgang mit den Abfällen und den finanziellen Aufwendungen hierfür belastet (Verursacherprinzip) – sofern die Prognose zum Langzeitverhalten zutreffend war.
- Der Zugang zu den radioaktiven Stoffen zwecks Missbrauchs ist durch geologische Barriere und Verschluss des Endlagers stark erschwert.

Nachteile

- Die dauerhafte Funktionstüchtigkeit der Barrieren kann für die erforderlichen langen Zeiträume (eine Million Jahre) nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden.
- Der Handlungsspielraum nachfolgender Generationen wird bezüglich eines möglichst sicheren Umgangs nach jeweils aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik eingeengt.

3.1.3 Endlagerung mit Rückholbarkeit

Die radioaktiven Abfälle werden in ein Bergwerk in tiefen geologischen Formationen eingelagert. Ein Verschluss des Endlagers erfolgt nur in einem Umfang, der beispielsweise bei unvorhergesehenem Systemverhalten eine relativ leichte Rückholung der Abfälle erlaubt. Die Rückholbarkeit ist für einen gewissen, vom konkreten Konzeptdesign abhängigen Zeitraum vorgesehen. Das Systemverhalten Abfälle - Barrieren wird in diesem Zeitraum überwacht. Danach wird das Endlager nach dann aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik verschlossen.

Es wird davon ausgegangen, dass in einem mehr oder weniger überschaubaren Zeitraum (einige 10er bis einige 100er Jahre) zusätzliche Erkenntnisse über das Systemverhalten vorliegen oder neue Behandlungsverfahren zur Verminderung des Gefahrenpotenzials der radioaktiven Abfälle entwickelt wurden. Teilweise wird auch die Möglichkeit der weiteren Verwertung der Abfälle als Grund für die Rückholbarkeit genannt.

Vorteile

- Es kann jederzeit eingegriffen werden, wenn nachteilige Entwicklungen im geologischen Verhalten, an den Abfälle oder in der Wechselwirkung zwischen beiden (z.B. Auswirkung der aus den Abfällen abgegebenen Wärme) auftreten.
- Die Auswirkung möglicher Einflüsse von außen (z.B. Erdbeben, Wetter) ist gering.
- Die nächsten Generationen haben die Entscheidungsmöglichkeit, was mit den Abfällen geschehen soll.

Nachteile

- Durch die Offenhaltung des Bergwerks und der Zugänglichkeit der Abfälle kann das Systemverhalten negativ beeinflusst werden (z.B. Stabilität der technischen Barrieren).
- Ein unvorhergesehenes geologisches Systemverhalten ist erst in langen Zeiträumen zu erwarten. Deshalb kann die dauerhafte Funktionstüchtigkeit der Barrieren für den erforderlichen langen Zeitraum (1 Million Jahre) auch nach einer Offenhaltungszeit von einigen 100 Jahren nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden.
- Die Wahl des Wirtsgesteins ist möglicherweise eingeschränkt, da bei natürlicherweise stark konvergierendem Gestein bei längerem Offenhalten ein hoher Aufwand hierfür erforderlich ist.
- Der Zugriff auf die radioaktiven Stoffe zwecks Missbrauchs ist nicht durch geologische bzw. geotechnische Barrieren behindert.
- Zukünftige Generationen werden mit dem Umgang mit den radioaktiven Abfällen und den hierfür notwendigen finanziellen Aufwand belastet.
- Für eine Offenhaltungsphase von einigen 100 Jahren sind die gesellschaftlichen Entwicklungen schlecht vorhersagbar.

3.1.4 Kontrollierte geologische Langzeit-Lagerung

Die radioaktiven Abfälle werden in ein Bergwerk in tiefen geologischen Formationen eingelagert. Das Endlager besteht aus Testlager, Pilotlager und Hauptlager. In dem gestuften Vorgehen wird als erster Teil der Gesamtanlage das Testlager errichtet. Es dient für standortbezogene Untersuchungen zum Führen der Sicherheitsnachweise für das Hauptlager.

In das Pilotlager wird ein repräsentativer Teil des vorgesehenen Gesamtinventars eingelagert und versetzt. Die technischen und geotechnischen Barrieren werden über die Betriebszeit des Hauptlagers hinaus überwacht. Mit geeigneten Untersuchungen sollen Modellannahmen für den Langzeitsicherheitsnachweis bestätigt werden. Darüber hinaus sind die Erkenntnisse die Grundlage für die turnusmäßige Entscheidung, ob das Endlager endgültig verschlossen oder weiter überwacht werden soll, ob technische Barrieren im Hauptlager überprüft werden müssen oder ob die Abfälle wieder herausgeholt werden müssen.

In das Hauptlager wird nach der Einlagerung in das Pilotlager der weit überwiegende Anteil der radioaktiven Abfälle eingelagert. Es wird abschnittsweise verfüllt und versiegelt, sobald die Abfälle jeweils eingelagert sind. Diese Maßnahmen erfolgen so, dass eine Rückgewinnung der Abfälle technisch relativ einfach möglich bleibt. Die Zugangs- und Bedienungstollen bleiben offen. Alle Maßnahmen dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigen.

Für den Betrieb des Pilotlagers wird ein Zeitraum von etwa 100 Jahren diskutiert. Nach endgültigem Verschluss soll keine weitere Überwachung erfolgen. Im Gegensatz zur Rückholbarkeit handelt es sich hier um Reversibilität der Endlagerung.

Vorteile

- Die gestufte Vorgehensweise erhöht die Belastbarkeit der Sicherheitsnachweise für den anfänglichen Zeitraum der Endlagerung (einige 100 Jahre).
- Die Auswirkung möglicher Einflüsse von außen ist gering.
- Die nächsten Generationen haben die Entscheidungsmöglichkeit, was mit den Abfällen geschehen soll.

Nachteile

- Durch die Offenhaltung des Bergwerks kann das Systemverhalten negativ beeinflusst werden (z.B. Stabilität der geotechnischen Barrieren).
- Die dauerhafte Funktionstüchtigkeit der Barrieren – vor allem der geologischen - kann für den erforderlichen langen Zeitraum (1 Million Jahre) auch nach einer Überwachungszeit von wenigen 100 Jahren nicht mit Sicherheit vorhergesagt bzw. nachgewiesen werden.
- Für eine Offenhaltungsphase von einigen 100 Jahren sind die gesellschaftlichen Entwicklungen schlecht vorhersagbar.

3.1.5 Langzeit-Zwischenlagerung

Die Langzeit-Zwischenlagerung soll bis zu einigen hundert Jahren in einem Bauwerk an der Erdoberfläche oder oberflächennah erfolgen. Es kommt eventuell auch ein vorhandenes Bergwerk infrage. Diese Lagerung der radioaktiven Abfälle soll solange erfolgen, bis über einen endgültigen Umgang bzw. Verbleib auf sicherer Basis entschieden werden kann. Die Lagerung wird überwacht und erforderlichenfalls Reparaturmaßnahmen durchgeführt.

Vorteile

- Nach der Entwicklung von im Vergleich zu heute sichereren Umgangsoptionen können diese problemlos umgesetzt werden.
- Der Handlungsspielraum zukünftiger Generationen ist voll gegeben.

Nachteile

- Ob bessere Umgangsoptionen gefunden werden und wie lange ggf. ihre Entwicklung dauert ist nicht vorhersagbar.
- Die Entwicklung der gesellschaftlichen Verhältnisse ist wesentlich schlechter vorherzusagen als geologische Entwicklungen.
- Das Gefahrenpotenzial der Abfälle ist bei Einwirkungen von außen leicht zugänglich und freisetzbar.

- Es sind eine ständige Überwachung der Abfälle und nach heutigem Stand der Technik in größeren Abständen Reparatur- oder Umpackmaßnahmen erforderlich, die Störfallrisiken erhöhen und zusätzliche Strahlenbelastungen für Personal und Bevölkerung verursachen.
- Der Zugriff auf die Abfälle zwecks Missbrauchs ist relativ leicht möglich.
- Das Problem des definitiven Umgangs mit den radioaktiven Abfällen und die Finanzierung dafür werden auf kommende Generationen verlagert.

3.2 Waste-Management für schwach- und mittelradioaktive Abfälle

Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle werden nach ihrem Anfall übergangsweise gelagert. Vor einer folgenden Zwischenlagerung oder dem Verbringen in ein betriebsbereites Endlager werden die Abfälle zur Verringerung ihres Gefahrenpotenzials behandelt und verpackt. Beispielsweise werden flüssige Abfälle verfestigt oder flüssige und feste brennbare Abfälle verbrannt.

Die Endlagerung der Abfälle erfolgt entweder in tiefen geologischen Formationen oder oberflächennah in mit Erdreich bedeckten Poldern. Welche der beiden Optionen verfolgt wird, hängt im Wesentlichen von den Halbwertszeiten des zulässigen Radioaktivitätsinventars ab. Bei der oberflächennahen Endlagerung ist der Anteil von Radionukliden mit einer Halbwertszeit von mehr als 30 Jahren deutlich stärker begrenzt. Aufgrund des unterschiedlichen Radionuklidinventars sind auch unterschiedliche Sicherheitsanforderungen (z.B. Langzeitsicherheit) zu stellen. Insofern ist ein direkter Vergleich der beiden Optionen nur eingeschränkt möglich bzw. sinnvoll. Es muss die Gesamtheit der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle betrachtet werden.

3.2.1 Endlagerung in tiefen geologischen Formationen

Die Endlagerung der konditionierten Abfälle erfolgt in der Regel in einem Bergwerk. Die Zwischenräume von Abfallgebinden werden verfüllt und das Endlager nach Erreichen der vorgesehenen Einlagerungskapazität verschlossen. Nach dem Verschluss ist keine Überwachung vorgesehen.

Abfälle, deren Radionuklidinventar kürzere Halbwertszeiten besitzt, kommen auch in das geologische Endlager.

Vorteile

- Der Abstand zwischen den endgelagerten Abfällen und der oberirdischen Umwelt ist sehr groß.
- Es können alle Arten schwach- und mittelradioaktiver Abfälle eingelagert werden.
- Ein späterer Zugriff auf die Abfälle ist mit großem Aufwand verbunden.

Nachteile

- Die dauerhafte Funktionstüchtigkeit der Barrieren kann für den erforderlichen langen Zeitraum (eine Million Jahre) nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden.

3.2.2 Oberflächennahe Endlagerung

Die Technologie der oberflächennahen Endlagerung wird bereits seit vielen Jahren betrieben. Die sicherheitstechnischen Anforderungen mussten aufgrund negativer Erfahrungen (z.B. im inzwischen stillgelegten Endlager Manche in Frankreich) im Laufe der Zeit erhöht werden. Für moderne oberflächennahe Endlager müssen die festen einzulagernden Abfälle konditioniert und in Behälter verpackt sein. Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Konditionierung der Abfälle sind in der Regel geringer als für die geologische Tiefenlagerung, auch weil es sich meist um ein Radionuklidinventar mit kürzeren Halbwertszeiten handelt. Die Behälter werden in einer während der Einlagerung überdachten Betonzelle gestapelt. Die Betonzelle wird in der Regel auf einer Tonschicht errichtet. Die Zwischenräume von Behältern werden verfüllt. Ist die Betonzelle gefüllt, wird sie mit einem Betondeckel verschlossen und zur Wasserabweisung mit Folie überdeckt. Nach Verschluss der Betonzellen des gesamten Endlagers werden diese mit Ton, weiteren unterschiedlichen Materialien und Erde bedeckt. Das Endlager soll dann ca. 300 Jahre überwacht werden.

Vorteile

- Der Langzeitsicherheitsnachweis ist aufgrund der geringeren Halbwertszeiten auf einige 100 Jahre beschränkt und deshalb mit weniger Unsicherheiten belastet.

- Oberflächennahe Endlager sind schneller verfügbar.
- Das Monitoring ist relativ einfach, sofern in das Konzept von Anbeginn eingeflossen.

Nachteile

- Im Falle einer Freisetzung gelangen die Radionuklide ohne Verzögerung in Oberflächenwässer.
- Eine Beeinträchtigung durch Erdbeben oder starke äußere Einflüsse ist für oberflächennahe Endlager nicht auszuschließen.
- Die eingelagerten Abfälle dürfen nur wenige Radionuklide mit Halbwertszeiten größer 30 Jahre beinhalten. Schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit längeren Halbwertszeiten müssen in ein anderes Endlager.

3.3 Waste-Management für sehr schwachradioaktive Abfälle

Für den Umgang mit sehr schwachradioaktiven Abfällen gibt es neben der Behandlung wie schwachradioaktive Abfälle zwei Optionen, die Freigabe der Abfälle in den konventionellen Bereich und die Endlagerung unter im Vergleich zu den oben genannten oberflächennahen Endlagern sicherheitstechnisch verringerten Anforderungen.

3.3.1 Freigabe

In der Europäischen Union ist nach Artikel 5 der Richtlinie 96/29/EURATOM die Freigabe von radioaktiven Abfällen aus dem Atomrecht zulässig. Hierzu muss das Radioaktivitätsinventar dieser Abfälle national festgelegte Freigabewerte unterschreiten. Die Freigabe kann zur Beseitigung (z.B. Deponierung), Wiederverwertung oder Weiterverwendung erfolgen.³

³ Richtlinie 96/29/EURATOM des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung; Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 159, 39. Jahrgang, 29. Juni 1996

Inwieweit die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union von dieser Regelung Gebrauch machen, ist ihnen überlassen.

Vorteile

- Die Menge der in ein geologisches oder oberflächennahes Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle einzulagernden Abfälle wird verringert.
- Die Strahlenbelastungen für das Personal des Endlagers reduzieren sich.

Nachteile

- Die sehr schwachradioaktiven Abfälle werden kontrollierten Bereichen entzogen und in der Umwelt verteilt. Die Hintergrundstrahlung wird dadurch langfristig erhöht.
- Durch Aufkonzentrierung von Radionukliden aus den freigegebenen Abfällen in der Umwelt oder durch verstärkten Umgang mit diesen Abfällen kann es zu erhöhten Strahlenbelastungen für Personen aus der Bevölkerung kommen.

3.3.2 Endlagerung mit geringeren Sicherheitsanforderungen

Die sehr schwachradioaktiven Abfälle werden ähnlich den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in einem oberflächennahen Endlager eingelagert. Die sicherheitstechnischen Anforderungen zur Konditionierung der Abfälle und zur Abdichtung des Endlagers gegen die Umwelt sowie der Aufwand für Überwachungsmaßnahmen sind jedoch geringer.

Vorteile

- Die Menge der in ein geologisches oder oberflächennahes Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle einzulagernden Abfälle wird verringert.
- Die Abfälle sind anders als bei der Freigabe in einer Anlage konzentriert und werden nicht in der Umwelt verteilt.
- Die Rückhaltung der Radionuklide wird für einen gewissen Zeitraum überwacht.

Nachteile

- Durch die sicherheitstechnisch geringeren Anforderungen im Vergleich zu einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ist eher eine Freisetzung von Radionukliden möglich.

3.4 Fazit zu den Waste-Management-Konzepten

Eines der größten Probleme durch die Nutzung der Atomenergie zur Strom- und Wärmeerzeugung ist der Umgang mit den dabei anfallenden radioaktiven Abfällen. Die vorstehende Beschreibung der existierenden oder in Entwicklung befindlichen Waste-Management-Konzepte zeigt, dass es zwar Ansätze gibt, mögliche Auswirkungen des Gefahrenpotenzials der Abfälle zu beschränken, aber keine Möglichkeit gibt, das Gefahrenpotenzial vollständig zu beseitigen.

Durch die sicherheitstechnisch in Abhängigkeit des Radionuklidinventars abgestufte Vorgehensweise gilt das für alle Arten radioaktiver Abfälle.

Ausgehend von der Tatsache, dass ein Umgang mit den radioaktiven Abfällen auch beim Ausstieg aus der Atomenergienutzung nicht vermeidbar ist, zeigt ein Vergleich der Waste-Management-Konzepte jeweilige Vor- und Nachteile für alle Konzepte. Aufgrund der großen Risiken bei Wiederaufarbeitung und P&T sind diese aus sicherheitstechnischer Sicht vollkommen abzulehnen.

Die Langzeit-Zwischenlagerung bietet keine Möglichkeit einer nachhaltigen Verhinderung der Freisetzung radioaktiver Stoffe für mehrere Jahrhunderte oder gar noch längerer Zeiträume. Problematisch sind außerdem die vollständige Übertragung der Verantwortung für die radioaktiven Abfälle auf zukünftige Generationen und die große Unsicherheit bei der Vorhersage gesellschaftlicher Entwicklungen (Gesellschaftssystem, Sicherheitskultur, Wirtschaftlichkeitsdenken) für mehr als wenige Jahrzehnte.

Für alle Endlagerkonzepte gilt, dass die vermeintliche Sicherheit nur auf Vorhersagen aufgrund rückschauend gewonnener empirischer Kenntnisse sowie auf Basis einer für Menschen zu jedem Zeitpunkt auf das gegenwärtige Wissen beschränkter Erkenntnis beruht.

Ein exakter naturwissenschaftlicher Nachweis der Langzeitsicherheit kann heute (und nach derzeitigem Kenntnisstand auch auf absehbare Zeit) nicht erbracht werden. Möglich ist allenfalls ein Plausibilitätsnachweis, der mehr oder weniger stark begründet sein kann. Dabei ist zu beachten, dass die eingesetzten Nachweisverfahren begrenzt sind und vielfach subjektive Meinungen (expert judgement) einfließen, die – auch wenn sie Mehrheitsmeinungen sind – nicht dem späteren tatsächlichen Systemverhalten entsprechen müssen.

Ergebnis: Das Problem Atommüll ist mit keiner der aktuell diskutierten Waste-Management-Optionen zu lösen. Es ist lediglich die Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile möglich, um zu einer Entscheidung für die relativ beste der Optionen zu kommen.

4. Waste-Management in EU, RF und USA

Im Folgenden werden die Waste-Management-Situationen und die verfolgten Strategien in den einzelnen EU-Mitgliedsstaaten betrachtet, in denen Atomanlagen für die Atomenergienutzung zur Strom- und Wärmeproduktion (Uranabbau, AKW, Versorgungs- und Waste-Managementanlagen) betrieben werden.

Wegen der Bedeutung für die EU werden auch die Waste-Management-Strategien der Russischen Föderation und der USA beschrieben sowie auf dort vorhandene Probleme hingewiesen. Vor allem für einige osteuropäische Staaten ist das von erhöhter Bedeutung.

Als Daten- und Informationsquellen werden die staatlichen Berichte zur Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management 2009, die Antworten auf Fragen zum Bericht der Staaten im Rahmen der Joint Convention sowie der Sixth Situation Report Radioactive Waste and Spent fuel Management in the European Union von 2008 herangezogen. Angaben zu den Mengen angefallener Abfälle sind darin nicht für jeden Staat für jede Art radioaktiver Abfälle enthalten. Wegen des hohen Rechercheaufwandes für Informationen zu Atommüllmengen aus anderen Quellen war die Ergänzung im Rahmen dieser Studie nur teilweise möglich. Für einige EU-Mitgliedsstaaten können die Atommüllmengen hier deshalb nicht vollständig wiedergegeben werden.

Radioaktive Abfälle, die außerhalb der Atomenergienutzung zur Strom- oder Wärmeerzeugung anfallen werden hier nur berücksichtigt, wenn mit allen radioaktiven Abfälle in denselben Anlagen umgegangen wird. Sofern im folgenden Unterkapitel nicht anders vermerkt, stammen die Mengenangaben für den jeweiligen Atommüll aus den Joint Convention Berichten und beziehen sich auf den Stand vom 31.12.2007. Aktuellere Daten sind meist nicht veröffentlicht. Außerdem enthält nicht jeder Joint Convention Bericht eine Aufschlüsselung des vorhandenen Atommülls für einzelne Anlagen. In diesen Fällen werden in den folgenden Tabellen die jeweilige Gesamtmengen genannt.

Die im Folgenden als stillgelegt bezeichneten Anlagen sind alle Anlagen, die sich in einem Stadium nach Abschaltung und vor abgeschlossenem Abriss befinden.

4.1 Situation und Strategien in EU-Mitgliedsstaaten

Belgien

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Belgien sind 4 Leistungsreaktoren in Doel und 3 in Tihange in Betrieb.

Weiterhin laufen in Mol drei Forschungsreaktoren.

Außerdem wird eine Brennelementfabrik betrieben.

In Stilllegung befinden sich die Wiederaufarbeitungsanlage EUROCHEMIC, die Brennelementfabrik in Dessel, das alte SCK/CEN Abfallzentrum und je ein Forschungsreaktor in Mol und Gent.

Waste-Management-Konzept:

- Zwischenlagerung **bestrahlter Brennelemente** an den AKW-Standorten.
- Es gibt keine endgültige Entscheidung, ob bestrahlte Brennelemente wiederaufgearbeitet oder direkt endgelagert werden sollen. Es besteht lediglich ein Moratorium zur Wiederaufarbeitung. Im Jahr 2011 sollen der Regierung die Grundlagen für eine Entscheidung vorliegen. Die Wahrscheinlichkeit der Wiederaufnahme der Wiederaufarbeitung in La Hague ist allerdings gering.

-
- Referenzkonzept ist momentan die Direkte Endlagerung in einer tiefen geologischen Tonformation.
 - Kurze Pufferlagerung von **schwach- und mittelradioaktiven** Abfällen an den Entstehungsstandorten.
 - Konditionierung am Entstehungsstandort oder im zentralen Abfallbehandlungszentrum.
 - Zentrale Zwischenlagerung der Abfälle.
 - Endlagerung der kurzlebigen schwach- und mittelradioaktiven Abfälle in Oberflächenendlager.
 - **Sehr schwachradioaktive Abfälle** können freigegeben werden.

Status Endlager

Es werden intensive Untersuchungen zum Verhalten von Ton bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle durchgeführt. In Mol wird ein Untertagelabor betrieben. Eine Standortentscheidung wird gegenwärtig nicht angestrebt. In einer hypothetischen Planung wird von einer Inbetriebnahme des geologischen Endlagers für hochradioaktive Abfälle im Jahr 2080 ausgegangen.

Das Oberflächenendlager für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle soll am Standort Dessel errichtet werden und 2016 in Betrieb gehen.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Bis zum Jahr 2001 wurden Brennelemente mit 670 tSM in La Hague wiederaufgearbeitet. Es ist bisher nur ein kleiner Teil der abzunehmenden Abfälle aus Frankreich nach Belgien transportiert worden.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Doel	in Betrieb	2.675 tSM *
	Zwischenlager (trocken)	Doel	in Betrieb	
	Reaktor-Lagerbecken	Tihange	in Betrieb	
	Zwischenlager-becken	Tihange	in Betrieb	
HLW **	Zwischenlager	Dessel	in Betrieb	35 m ³
	Zwischenlager	Mol	in Betrieb	244 m ³
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Zwischenlager (trocken)	Dessel	in Betrieb	2 tSM
BE / HLW	Endlager	nicht festgelegt	Inbetriebnahme evtl. 2080	-
LILW **	Zwischenlager	Mol	in Betrieb	16.583 m ³
	Zwischenlager	Dessel	in Betrieb	544 m ³
	Oberflächen-Endlager	Dessel	Inbetriebnahme 2016	-
VLLW	Keine Angaben über Verbleib und Menge der freigegebenen Abfälle			

Alle Zahlen für 31.12.2007, außer

* Angabe für 31.12.2004 aus 6th Situation Report⁴. Im Joint Convention Bericht wurden Angaben zu Brennelementen aus Sicherheitsgründen verweigert.

** Im 6th Situation Report⁹ für 31.12.2004 waren bereits 444 m³ für HLW bzw. 17.000 m³ für LILW angegeben. Weshalb die Angaben im Joint Convention Report für 31.12.2007 geringer sind, konnte nicht geklärt werden.

⁴ Commission of the European Communities: Sixth Situation Report Radioactive Waste and Spent Fuel Management in the European Union, COM(2008)542 final, September 2008

Besondere Probleme für Waste-Management

Die bestrahlten Brennelemente und die hochradioaktiven Abfälle müssen über einen sehr langen Zeitraum zwischengelagert werden, da ihr endgültiger Verbleib in einem Endlager nicht vor 2080 vorgesehen ist. In welchem Zustand sich der Atommüll dann befindet bzw. welches Gefahrenpotenzial er dann hat, ist nicht vorhersagbar.

Bulgarien

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

Zwei Reaktoren sind in Kozloduy in Betrieb Zwei weitere sind in Belene geplant, die Finanzierungsmöglichkeiten sind aber momentan unklar.

Vier Reaktoren werden am Standort Kozloduy stillgelegt.

Ein Forschungsreaktor wurde zum Umbau in einen mit geringerer Leistung stillgelegt.

Waste-Management-Konzept:

- Nach Abklinglagerung der **bestrahlten Brennelemente** in den Reaktorlagerbecken erfolgt Zwischenlagerung in den Lagerbecken des externen Zwischenlagers am gleichen Standort.
- Für den größten Teil der gegenwärtig anfallenden Brennelemente ist die Wiederaufarbeitung in Russland vorgesehen.
- Eine längerfristige Zwischenlagerung von hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in Russland soll nach dessen Inbetriebnahme in einem Trockenlager erfolgen. Dort können auch bestrahlte Brennelemente gelagert werden.
- **Forschungsreaktor-Brennelemente** werden in die Russische Föderation überführt.
- Pufferlagerung von **schwach- und mittelradioaktiven Abfällen** in den Reaktorgebäuden.
- Zentrale Konditionierung am AKW-Standort und dortige Zwischenlagerung.

- Endlagerung in einem oberflächennahen Endlager.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** sollen später freigegeben werden.

Status Endlager

Es sind keine zielstrebigen Arbeiten zu einem Endlager für hochradioaktive Abfälle bzw. bestrahlte Brennelemente bekannt.

Im Jahr 2009 wurde mit der Standortsuche für ein oberflächennahes Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle begonnen. Vier Standorte werden dabei berücksichtigt.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Im Rahmen der nach 1998 mit der Russischen Föderation abgeschlossenen Wiederaufarbeitungsverträge wurden 2.367 tSM Brennelemente bis zum 31.07.2008 nach Russland transportiert. Die bei der Wiederaufarbeitung anfallenden radioaktiven Abfälle müssen zurückgenommen werden.

Bis 1992 wurde in 40 Bergwerken Uranerz gewonnen und in Bulgarien verarbeitet. Die entstanden Abfälle wurden vorort belassen und isoliert.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Kozloduy 1-6	in Betrieb	380 tSM
	Zwischenlagerbecken	Kozloduy	in Betrieb	492 tSM
BE / HLW	Endlager	Ort noch nicht festgelegt	Keine Planung	-
LILW flüssig	Reaktorlager-tanks	Kozloduy	in Betrieb	6.928 m ³ *
	Reaktorlager-tanks	Sofia	in Betrieb	50 m ³
LILW	Reaktorlager	Kozloduy	in Betrieb	1.506 m ³ *

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LILW	Zwischenlager	Kozloduy	in Betrieb	3.959 m ³ *
	Oberflächen- nahes Endlager	Ort noch nicht festgelegt.	Inbetriebnahme 2015	-
U-haltige Abfälle	Halden + Schlammabsetz- anlagen	Buchovo	?	1,3·10 ⁶ m ³ + 4,5·10 ⁶ t

Alle Zahlen für 31.07.2008 aus Joint Convention Bericht 2009, außer

* Zahlen für 31.12.2009 aus Annual Report 2009⁵

Besondere Probleme für Waste-Management

Die Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen und die Verwendung der dabei abgetrennten Kernbrennstoffe in neuen Brennelementen erfordern einen vielfältigen Umgang mit radioaktiven Stoffen. Die Folgen davon sind

- Strahlenbelastungen von Personal,
- umfangreiche Freisetzungen von radioaktiven Stoffen und dadurch zusätzliche Strahlenbelastungen von Bevölkerung und Umwelt,
- hohes Stör- und Unfallrisiko,
- hohes Proliferationsrisiko.

Diese Auswirkungen werden von Bulgarien in einen Nicht-EU-Mitgliedsstaat (Russische Föderation) verlagert. Dabei ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass dort in den meisten Fällen geringere Sicherheitsanforderungen etabliert sind als in EU-Mitgliedsstaaten mit Wiederaufarbeitungsanlagen.

In Bulgarien werden schwach- und mittelradioaktive Abfälle an den Reaktorstandorten sehr lange im flüssigen Zustand gelagert. Dies bedeutet ein erhöhtes Gefahrenpotenzial.

Inwieweit mit den Hinterlassenschaften des Uranbergbaus und der Uranerzverarbeitung umweltgerecht umgegangen wurde kann hier nicht beurteilt werden.

⁵ Nuclear Regulatory Agency Republic of Bulgaria: Report 2009

Deutschland

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Deutschland werden 17 Leistungsreaktoren an 12 Standorten betrieben.

17 Leistungs- und Prototypreaktoren befinden sich an 12 Standorten in der Stilllegung.

Es werden 3 Forschungsreaktoren betrieben und 8 befinden sich in der Stilllegung.

Vier Forschungszentren haben umfangreiche kerntechnische Infrastruktur.

Außerdem gibt es eine Urananreicherungsanlage und eine Brennelementfabrik.

Neben den Reaktoren sind auch eine Pilot-Wiederaufarbeitungsanlage und einige Forschungseinrichtungen in Stilllegung.

Waste-Management-Konzept:

- **Bestrahlte Brennelemente** werden zunächst zum Abklingen wenige Jahre in den Reaktorlagerbecken zwischengerlagert.
- Umladen der Brennelemente in Transport- und Lagerbehälter und Zwischenlagerung in Hallen an den AKW-Standorten.
- Endlagerung ohne Rückholbarkeit in tiefer geologischer Formation.
- Konditionierung und Zwischenlagerung **schwach- und mittelradioaktiver Abfälle** an den Entstehungsorten oder zentral.
- Endlagerung in tiefer geologischer Formation.
- **Abgereichertes Uran** aus der Anreicherungsanlage wurde bisher zum größten Teil zur Wiederanreicherung in die Russische Föderation gebracht. Das weiter abgereicherte Uranhexafluorid verblieb dort.
- Zukünftig wird es in Süd-Frankreich zu Uranoxid konvertiert.
- Nach dem Rücktransport des Urans wird es in Gronau gelagert. Für den weiteren Umgang gibt es bisher kein Konzept.

- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** werden zur Beseitigung (Deponie oder Verbrennungsanlage) oder Weiterverwendung freigegeben.

Status Endlager

Für bestrahlte Brennelemente, hochradioaktive und einen Teil mittelaktiver Abfälle ist kein Endlagerstandort benannt. Am Standort Gorleben wird der Salzstock durch untertägige Erkundung auf seine Eignung geprüft. Ob noch ein Standortsuchverfahren unter Berücksichtigung geowissenschaftlicher und sicherheitstechnischer Kriterien durchgeführt wird, steht nicht fest.

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle existiert ein genehmigtes Endlager in Salzgitter, dessen Inbetriebnahme voraussichtlich 2019 erfolgen soll.

An den Standorten Asse und Morsleben gibt es seit einiger Zeit geschlossene, aber inzwischen einsturzgefährdete Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Bis zum Jahr 2005 wurden insgesamt 6.258 tSM zur Wiederaufarbeitung im Ausland nach Frankreich, Großbritannien und Belgien sowie 90 tSM zur Wiederaufarbeitung im Inland nach Karlsruhe transportiert.

Ferner wurden 327 tSM zum endgültigen Verbleib zu anderen Anlagen im Ausland transportiert.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Brunsbüttel	in Betrieb	76 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Krümmel	in Betrieb	125 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Brokdorf	in Betrieb	322 tSM

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Unterweser	in Betrieb	217 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Grohnde	in Betrieb	425 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Emsland	in Betrieb	435 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Biblis	in Betrieb	704 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Neckarwestheim	in Betrieb	527 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Neckarwestheim	in Betrieb	527 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Gundremmingen	in Betrieb	860 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Isar	in Betrieb	556 tSM
	Reaktor-Lagerbecken + Zwischenlager (trocken)	Grafenrheinfeld	in Betrieb	298 tSM

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Zwischenlager (nass)	Obrigheim	in Betrieb	100 tSM
	Zwischenlager (trocken)	Greifswald	in Betrieb	583 tSM
	Zwischenlager (trocken)	Ahaus	in Betrieb	55 tSM
	Zwischenlager (trocken)	Gorleben	in Betrieb	37 tSM
HLW	Zwischenlager	Karlsruhe	in Betrieb	56 m ³
	Zwischenlager	Gorleben	in Betrieb	433 m ³
	Zwischenlager	Ahaus	in Betrieb	1.252 m ³
	Zwischenlager	Forschungseinrichtungen	in Betrieb	97 m ³
BE / HLW	geologisches Endlager	nicht festgelegt	Inbetriebnahme ?	-
LILW	Reaktorlager	AKW in Betrieb	in Betrieb	11.495 m3
	Reaktorlager	AKW in Stilllegung	in Betrieb	8.702 m3
	Zwischenlager	Unterweser	in Betrieb	1.148 m3
	Zwischenlager	Gorleben	in Betrieb	6.201 m3
	Zwischenlager	Mitterteich	in Betrieb	4.925 m3
	Zwischenlager	Hanau	in Betrieb	6.588 m3
	Zwischenlager	Greifswald	in Betrieb	3.644 m3
	Zwischenlager	Karlsruhe	in Betrieb	16.196 m3
	Zwischenlager	Forschungseinrichtungen	in Betrieb	49.187 m3
	geologisches Endlager	Asse	in Stilllegung	47.000 m3

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LILW	geologisches Endlager	Mosleben	in Stilllegung	36.753 m ³ 6.617 Quellen
	geologisches Endlager	Salzgitter	Inbetriebnahme 2019	-
VLLW	Keine Angaben über Mengen und Verbleib der freigegebenen Abfälle			
U-haltige Abfälle	Halden + Schlammabsetzanlage	Wismut in Thüringen + Sachsen	in Rekultivierung	Keine Angaben

Alle Angaben 31.12.2007 aus Joint Convention Bericht 2009.

Besondere Probleme für Waste-Management

Die Grubengebäude der beiden Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle Asse und Morsleben sind instabil. Bei Asse droht zudem ein massiver Wassereintritt. Einlagerungskammersolen sind bereits durchfeuchtet. Ein Langzeitsicherheitsnachweis ist nicht zu führen. Deshalb sollen die Abfälle aus der Asse rückgeholt werden.

Der Standort Gorleben wurde ohne geowissenschaftliche Kriterien ausgewählt. Er droht hauptsächlich aufgrund äußerer Rahmenbedingungen als Endlagerstandort durchgesetzt zu werden.

Abgereichertes Uran aus der Anreicherungsanlage wurde in der Vergangenheit in großen Mengen als UF₆ zur Wiederanreicherung in die Russische Föderation gebracht. Etwa 4/5 des UF₆ (noch weiter abgereichertes Uran) bleibt in Russland. Die Verträge zwischen den Betreibern der Anlagen in Deutschland und in Russland enthalten keine bindenden sicherheitstechnischen Anforderungen für den weiteren Umgang mit diesem UF₆. Konzepte für den langfristigen Umgang sind in der Russischen Föderation offenbar nicht vorhanden. Es ist von einer Langzeitlagerung in sicherheitstechnisch unzureichenden Behältern im Freien auszugehen. Freisetzungen aus einem Behälter können in der Umgebung katastrophale Folgen haben.

Finnland

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Finnland werden jeweils zwei Leistungsreaktoren in Loviisa und Olkiluoto betrieben. Ein Reaktor ist in Bau. Ein Forschungsreaktor wird ebenfalls betrieben, in Espoo.

Waste-Management-Konzept:

- Bestrahlte **Brennelemente** aus Leistungsreaktoren sind laut Gesetz von 1994 radioaktive Abfälle. Das heißt eine Wiederaufarbeitung ist nicht zulässig.
- Zwischenlagerung der Brennelemente an den Reaktorstandorten in separaten Lagern.
- Endlagerung bestrahlter Brennelemente aus Leistungsreaktoren in Hartgestein in etwa 500 m Tiefe.
- Bei der Endlagerung wird Rückholbarkeit berücksichtigt.
- **Forschungsreaktor-Brennelemente** werden am Standort zwischengelagert.
- Eine Entscheidung, ob diese Brennelemente direkt endgelagert oder in die USA (Herkunftsland) zurück gebracht werden, ist noch nicht getroffen.
- Konditionierung **schwach- und mittelradioaktiver Abfälle** am Entstehungsstandort.
- Bei Erfüllung der Endlageranforderungen nach Pufferlagerung in oberflächennahes Endlager (Kavernen ca. 60 m tief) am jeweiligen AKW- Standort.
- Bei Nichterfüllung der Endlageranforderungen längere Zwischenlagerung an Standorten und spätere Endlagerung in tiefen Formationen.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** werden in das Meer (flüssige Abfälle) bzw. auf konventionellen Deponien beseitigt oder wiederverwendet. In Olkiluoto befindet sich eine entsprechende Deponie auf dem Kraftwerksgelände. In Loviisa wird auf einer externen Deponie entsorgt.

Status Endlager

Der Endlagerstandort für bestrahlte Brennelemente und andere hochradioaktive Abfälle in Olkiluoto wurde 2001 endgültig festgelegt. Am Standort ist ein geologisches Erkundungsbergwerk zur Erhebung der standortspezifischen Daten in Betrieb. Dieses Bergwerk soll Teil des gesamten Endlagers werden. Für 2012 wird die Errichtungsgenehmigung des gesamten Endlagers erwartet und etwa 2020 soll es in Betrieb gehen.

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle sind oberflächennahe Endlager an den AKW-Standorten in Betrieb.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Bis 1996 wurde ein Teil der Brennelemente (330 tSM) in der Russischen Föderation wiederaufgearbeitet.

Bis 1961 waren zwei Pilotanlagen zum Abbau und Zerkleinern von Uranerz in Betrieb, Eno (31.000 t) und Askola (1.000 t).

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Zwischenlager-becken	Loviisa	in Betrieb	428 tSM
	Zwischenlager-becken	Olkiluoto	in Betrieb	1.142 tSM
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Espoo	in Betrieb	4,2 kgSM
BE / HLW	Endlager	Nähe Olkiluoto	Inbetriebnahme 2020	-
LILW flüssig	Zwischenlager	Loviisa	in Betrieb	1.290 m ³
LILW	Zwischenlager	Loviisa	in Betrieb	239 m ³
	Zwischenlager	Olkiluoto	in Betrieb	1.334 m ³
	Zwischenlager	Espoo	in Betrieb	6 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Loviisa	in Betrieb	1.475 m ³

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LILW	Oberflächen- nahes Endlager	Olkiluoto	in Betrieb	4.790 m ³
VLLW	Zwischenlager	Olkiluoto	in Betrieb	51 m ³
VLLW	Deponie	Olkiluoto	in Betrieb	keine Angabe
U-haltige Abfälle	Halden + Schlammabsetz anlage	Eno Askola	Rekultivierung	keine Angabe

Alle Zahlen für 31.12.2007 aus Joint Convention Bericht 2009.

Besondere Probleme für Waste-Management

Wichtigstes Element im Endlagerkonzept ist die Wirksamkeit technischer Barrieren über mehrere hunderttausend Jahre. Die Endlagerung kann aufgrund der geologischen Situation in Skandinavien nur in Hartgestein erfolgen. Hartgestein ist jedoch geklüftet und somit wasserführend. Über einen langen Zeitraum kann die Rückhaltung der Radionuklide aus dem Atommüll deshalb nur mit einem gegen Korrosion extrem stabilen Material gewährleistet werden. Als sehr korrosionsbeständig galt bisher Kupfer, aus dem der Endlagerbehälter für Brennelemente gefertigt werden soll.

Im Jahr 2009 wurden in der Königlich Technischen Hochschule Stockholm Studienergebnisse veröffentlicht, die für die geochemischen Verhältnisse im geschlossenen Endlager einen sehr viel schnelleren Korrosionsfortschritt zeigen als nach bisherigem Kenntnisstand. Bereits nach 1.000 Jahren soll das Durchrosten beginnen. Das bedeutet Freisetzungen in Zeiträumen, in denen auch weniger langlebige Radionuklide noch nicht in großem Umfang zerfallen sind.

Frankreich

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Frankreich werden 58 Leistungsreaktoren an 19 Standorten betrieben. Ein Reaktor ist im Bau.

Es werden 9 Forschungsreaktoren an 4 Standorten betrieben.

Es gibt vier Anlagen zur Brennelement- bzw. Pelletfabrikation an 3 Standorten, zwei Konversionsanlagen an zwei Standorten und eine Anreicherungsanlage.

Zwei Wiederaufarbeitungsanlagen werden an einem Standort betrieben.

Es befinden sich 14 Leistungs- und Forschungsreaktoren an 11 Standorten sowie 10 andere Atomanlagen an 5 Standorten in Stilllegung.

Waste-Management-Konzept:

- Das gültige Waste-Management-Konzept baut auf einem Gesetz von 2006 auf.⁶
- **Bestrahlte Brennelemente** werden zunächst im Reaktorlagerbecken gelagert.
- Überwiegend Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente (bis 2009 ca. 850 tSM, ab 2010 ca. 1.050 tSM von jährlich in Frankreich anfallenden 1.150 tSM bestrahlter Brennelemente).
- Bestrahlte Brennelemente mit MOX oder wiederaufgearbeitetem Uran wurden in kleinen Mengen nur zu Demonstrationszwecken wiederaufgearbeitet. Stattdessen erfolgt Zwischenlagerung bis Einsatz in weiterentwickelten Reaktoren (GenIV) möglich.
- Für nicht wiederaufgearbeitete Brennelemente, bei der Wiederaufarbeitung entstehende hochradioaktive Abfälle sowie mittelradioaktive Abfälle mit längeren Halbwertszeiten werden zurzeit drei sich ergänzende Forschungs- und Entwicklungsgebiete verfolgt:
 - a) Abtrennung und Transmutation. Im Jahr 2012 soll ein Statusreport Aussagen zu den verschiedenen Technologien machen. Mit dem Bau von Pilotanlagen soll 2020 begonnen werden und 2040 sollen Anlagen im industriellen Maßstab in Betrieb gehen. Die Entwicklung soll eng verzahnt sein mit der Entwicklung neuer Reaktortechnologien.
 - b) Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Die Einlagerung soll für mindestens 100 Jahre reversibel sein. Das ist Referenzlösung für alle radioaktiven Abfälle, die aus Sicherheitsgründen nicht in Oberflächen-Endlager können.

⁶ Planning Act No. 2006-739 of 28 June 2006 Concerning the Sustainable Management of Radioactive Materials and Waste

c) Weiterentwicklung von Zwischenlager- und Konditionierungstechnologien, die spätestens 2015 einsetzbar sein sollen.

- **Forschungsreaktor-Brennelemente** werden teilweise wiederaufgearbeitet, teilweise bis zur Endlagerung zwischengelagert.
- **Schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit langlebigen Radionuklidinventar** werden meist an den Entstehungsstandorten zwischengelagert.
- Für einen Teil dieser Abfälle existiert noch kein entwickeltes Waste-Management-Konzept (z.B. Graphitabfälle aus Forschung und Betrieb von gasgekühlten und Schwerwasserreaktoren, bestimmte Schlämme aus der Wiederaufarbeitung, tritiumhaltige Abfälle) und für andere sind die Konditionierungsverfahren noch nicht erprobt (Natriumhaltige Abfälle aus der Brüterforschung, Uran-Molybdenlösungen aus der Wiederaufarbeitung).
- **Schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit kurzlebigen Radionuklidinventar** werden an den Entstehungsstandorten konditioniert.
- Baldmöglichste Einlagerung in Oberflächen-Endlager.
- Einlagerungsbereiche des Endlagers werden jeweils vollständig verfüllt und das gesamte Endlager nach Ausschöpfung der Kapazität mit mehreren Schichten unterschiedlichen Materials überdeckt.
- Oberflächen-Endlager wird für einen Zeitraum von ca. 300 Jahre nach seinem Verschluss überwacht.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** werden in Frankreich in einem Oberflächen-Endlager mit verminderten Sicherheitsanforderungen endgelagert. Im Ausnahmefall ist eine Freigabe von sehr schwachradioaktiven Abfällen möglich. Eine Freigabe darf aber in keinem Fall eine Wiederverwertung in Konsumprodukten oder Bauwerken zur Folge haben. Meist wird sie nur für kerntechnische Anwendungen zugelassen.
- **Uranhaltige Abfälle** aus der Anreicherung und der Brennelementfabrikation werden je nach Radioaktivitätsinventar in das Endlager für sehr schwachradioaktive Abfälle oder in das Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert.

- Die etwa 50 Millionen t aus der Uranerzbehandlung und etwa 200 Millionen t nicht verwertbares Gestein und Erzurückständen aus dem Uranbergbau lagern vorort.

Es gibt Materialien deren weiterer Verbleib nur teilweise geklärt ist. Beispiele sind abgereichertes Uran aus der Anreicherung, Brennelemente, die nicht wiederaufgearbeitet werden und Uran aus der Wiederaufarbeitung. Auch der Bestand an unbestrahltem Plutonium ist stetig gestiegen und belief sich Ende 2009 auf 56 t + 26t, die das Eigentum nicht-französischer Betreiber sind).

Status Endlager

Das Endlager für hochradioaktive und langlebige mittelradioaktive Abfälle soll in der Nähe vom derzeit betriebenen Untertageforschungslabor in Bure errichtet werden. Es soll 2025 in Betrieb gehen.

Ein oberflächennahes Endlager für langlebige schwachradioaktive Abfälle soll 2019 in Betrieb gehen.

Ein Oberflächen-Endlager (CSM) ist seit 1994 geschlossen und befindet sich seit 2003 für mindestens 300 Jahre in der Nachbetriebsphase (Überwachung).

Ein Oberflächen-Endlager für sehr schwachradioaktive ist in Morvellers und eines für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle ist in Aube in Betrieb.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Bis 2010 wurden französische Brennelemente mit ca. 16.000 tSM in La Hague wiederaufgearbeitet.

Es gibt ca. 200 Uranminen und 20 Anlagen zur Uranerzgewinnung und -aufbereitung, die alle geschlossen sind.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	AKW-Standorte	in Betrieb	3.923 tSM
	4 Lagerbecken	La Hague	in Betrieb, wird ausgebaut	9.421 tSM *
	Lagerbecken	Creys-Malville	in Betrieb	keine Angabe

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
HLW	3 Zwischenlager	La Hague	in Betrieb, wird ausgebaut	1.650 m ³ **
	Zwischenlager	Marcoule	in Betrieb	558 m ³ **
	Zwischenlager	CEA	in Betrieb	85 m ³ **
ILW langlebig	Zwischenlager	AKW-Standorte	in Betrieb	966 m ³
	Zwischenlager	La Hague	in Betrieb	19.171 m ³ **
	Zwischenlager	Marcoule	in Betrieb	10.684 m ³ **
	Zwischenlager	CEA	in Betrieb	10.727 m ³ **
	Zwischenlager	Forschungszentren	in Betrieb	2 m ³ **
	Zwischenlager	Bouches-du-Rhone	in Betrieb	8.043 m ³ **
	Oberflächen-nahes Endlager	noch kein Standort festgelegt	Inbetriebnahme 2019	-
Radium-haltige Abfälle	Zwischenlager	Charente-Maritime	in Betrieb	25.726 m ³ **
	Zwischenlager	Isère	geschlossen	1.929 m ³ **
	Zwischenlager	Vaucluse	in Betrieb	384 m ³ **
	Zwischenlager	Bouches-du-Rhône	in Betrieb	5.950 m ³ **
LLW langlebig	Zwischenlager	Le Bouchet	in Betrieb	11.867 m ³ **
	Zwischenlager	AKW-Standorte	in Betrieb	9.061 m ³ **
	Zwischenlager	La Hague	in Betrieb	4.952 m ³ **
	Zwischenlager	Marcoule	in Betrieb	37.874 m ³ **
	Zwischenlager	CEA	in Betrieb	4 m ³ **

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LLW langlebig	Zwischenlager	Forschungs- zentren	in Betrieb	63 m ³ **
Tritium-haltige Abfälle	Zwischenlager	Côte d'Or	In Betrieb	2.368 m ³ **
LILW kurzlebig	Reaktorlager	AKW- Standorte	in Betrieb	13.696 m ³ **
	Zwischenlager	Konditionierun gsanlagen	in Betrieb	1.819 m ³ **
	Zwischenlager	CEA	in Betrieb	8.037 m ³ **
	Zwischenlager	Forschungs- zentren	in Betrieb	852 m ³ **
LILW kurzlebig	Zwischenlager	Urananlagen	in Betrieb	849 m ³ **
	Oberflächen- Endlager (CSM)	La Hague, Manche	geschlossen	527.225 m ³
	Oberflächen- Endlager (CSA)	Soulaines, Aube	in Betrieb	208.053 m ³
Abfälle ohne Zuordnung	Zwischenlager	Standort nicht genannt	in Betrieb	1.564 m ³ **
VLLW	Reaktorlager	AKW- Standorte	in Betrieb	16.752 m ³ **
	Zwischenlager	CEA	in Betrieb	32.570 m ³ **
	Zwischenlager	Forschungs- zentren	in Betrieb	1.364 m ³ **
	Zwischenlager	Urananlagen	in Betrieb	28.637 m ³ **
	Zwischenlager	Konditionierun gsanlagen	in Betrieb	4.251 m ³ **
	Oberflächen- Endlager	Morvelliens	in Betrieb	89.331 m ³

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
U-haltige Abfälle	Halden + Schlammabsetz anlage	20 Standorte	geschlossen	33 Mio m ³ **

Alle Zahlen für 31.12.2007, außer

* Zahlen für 31.12.2009 (davon ca. 45 tSM aus dem Ausland)⁷

** Zahlen für 31.12.2007 aus National Inventory⁸

Besondere Probleme für Waste-Management

Ende 2007 waren in Frankreich 1.121 Orte erfasst, an denen radioaktive Abfälle lagerten.

Insgesamt ist bis 31.12.2007 eine Menge von 1.152.533 m³ radioaktiver Abfälle angefallen. Dazu kommen 33.000.000 m³ aus der Uranerzgewinnung, die auf 20 Anlagen verteilt sind.

Trotz dieser unter Umweltaspekten nicht nachhaltigen Art der Stromerzeugung soll in Frankreich auch in Zukunft Atomenergie genutzt werden.

Die Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen und die Verwendung der dabei abgetrennten Kernbrennstoffe in neuen Brennelementen erfordern einen vielfältigen Umgang mit radioaktiven Stoffen. Die Folgen davon sind

- Strahlenbelastungen von Personal,
- umfangreiche Freisetzungen von radioaktiven Stoffen und dadurch zusätzliche Strahlenbelastungen von Bevölkerung und Umwelt,
- hohes Stör- und Unfallrisiko,
- hohes Proliferationsrisiko.

Der ursprünglich für das geologische Endlager gesetzlich vorgeschriebene Vergleich von Standorten mit unterschiedlichen geologischen Formationen ist gescheitert. Als

⁷ Mycle Schneider: Reflexionen über Entsorgungsstrategien eines Rohstoffs mit negativem Marktwert, Vortrag, Uni-Hamburg, 1. Juli 2010

⁸ National Inventory of radioactive Material and Waste 2009, Synthesis Report, Andra

Endlagerregion ist jetzt Bure vorgesehen, in der gegenwärtig das Untertagelabor für Untersuchungen zur Endlagerung in Ton betrieben wird.

Für einen Teil der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle gibt es bisher kein Umgangskonzept.

Abgereichertes Uran aus der Anreicherungsanlage wurde in der Vergangenheit in großen Mengen als UF_6 zur Wiederaanreicherung in die Russische Föderation gebracht. Etwa 4/5 des UF_6 (noch weiter abgereichert) bleibt in Russland. Die Verträge zwischen den Betreibern der Anlagen in Frankreich und in Russland enthalten keine bindenden sicherheitstechnischen Anforderungen für den weiteren Umgang mit dem UF_6 . Konzepte für den langfristigen Umgang sind in der Russischen Föderation offenbar nicht vorhanden. Es ist von einer Langzeitlagerung in sicherheitstechnisch unzureichenden Behältern im Freien auszugehen. Freisetzungen aus einem Behälter können in der Umgebung katastrophale Folgen haben.

Großbritannien

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Großbritannien werden 19 Reaktoren an 9 Standorten betrieben.

Am Standort Sellafield werden zwei Wiederaufarbeitungsanlagen und eine MOX-Brennelementfabrik betrieben.

In Betrieb sind eine Urananreicherungsanlage in Capenhurst und eine Brennelementfabrik in Springfields.

Abfälle werden auch beim JET Fusionsexperiment erzeugt.

9 Leistungsreaktoren, 5 Forschungsreaktoren, 2 Wiederaufarbeitungsanlagen und eine Urananlage befinden sich in der Stilllegungsphase.

Waste-Management-Konzept:

- Die **bestrahlten Brennelemente** aus Magnox- und Fortgeschrittenen gas-gekühlten Reaktoren (AGR) werden nach kurzer Abklingzeit im Reaktorlagerbecken nach Sellafield transportiert und dort zwischengelagert, bis sie wiederaufgearbeitet werden.

-
- Die Brennelemente aus dem Leichtwasserreaktor werden am Reaktorstandort zwischengelagert.
 - Für die bestrahlten Brennelemente aus den jetzt betriebenen Reaktoren sollen die Betreiber entscheiden, ob sie wiederaufarbeiten oder direkt endlagern wollen. Der Betrieb der Wiederaufarbeitungsanlage THORP soll auf jeden Fall bis 2020 verlängert werden, um vor allem Brennelemente aus den AGR zu behandeln. Für Brennelemente aus vorgesehenen Reaktorneubauten wird bisher von ihrer direkten Endlagerung ausgegangen.
 - Zwischenlagerung von **hochradioaktiven Abfällen** am Entstehungsort für 50 Jahre.
 - Höher radioaktive Abfälle (auch Brennelemente, wenn sie zu Abfall erklärt werden) sollen in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden.
 - Zwischenlagerung **mittelradioaktiver Abfälle** an den Entstehungsorten.
 - Endlagerung mittelradioaktiver Abfälle in einer tiefen geologischen Formation.
 - Zwischenlagerung **schwachradioaktiver Abfälle** am Entstehungsort bzw. in Sellafield.
 - Endlagerung von schwachradioaktiven Abfällen in einem Oberflächenendlager.
 - **Sehr schwachradioaktive Abfälle** werden in Abhängigkeit von deren Menge auf überwachte oder nicht überwachte konventionelle Deponien verbracht.

Status Endlager

Ein Endlager für höher radioaktive Abfälle (einschließlich bestrahlter Brennelemente) soll 2075 in Betrieb gehen. Gegenwärtig wird mit dem Standortauswahlverfahren begonnen. Eine für den Endlagerstandort favorisierte Region ist West Cumbria.

Ein Endlager für mittelradioaktive Abfälle soll 2040 in Betrieb gehen.

Ein Endlager für schwachradioaktive Abfälle ist in Drigg in Betrieb.

Ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Dounreay muss aus Sicherheitsgründen geleert werden. 2013 soll dort ein neues Endlager in Betrieb gehen.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

In Großbritannien wurde der weit überwiegende Teil der angefallenen bestrahlten Brennelemente wiederaufgearbeitet. Welche Menge an Brennelementen in der MAGNOX-Wiederaufarbeitungsanlage bearbeitet wurde, konnte für diese Studie nicht ermittelt werden. In der anderen Wiederaufarbeitungsanlage THORP wurden bis 2009 ca. 1,700 tSM britische Brennelemente wiederaufgearbeitet.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	AKW	in Betrieb	620 tSM
	Zwischenlager	Sellafield	in Betrieb	5.220 tSM*
HLW	Zwischenlager	Sellafield	in Betrieb	1.730 m ³
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Dounreay und andere	in Betrieb	21 tSM
BE / HLW	Endlager	Kein Standort ausgewählt	Inbetriebnahme 2075	-
ILW	Zwischenlager	Sellafield	in Betrieb	63.900 m ³
	Zwischenlager	Aldermaston Dounreay Harwell AKW- Standorte	in Betrieb	28.600 m ³
LLW	Zwischenlager	Sellafield	in Betrieb	11.200 m ³
	Zwischenlager	Capenhurst	in Betrieb	10.700 m ³
	Zwischenlager	Dounreay	in Betrieb	6.860 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Dounreay	geschlossen	33.600 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Drigg	in Betrieb, wird erweitert	905.000 m ³

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
VLLW	Deponien	Keine Angaben zu Mengen und Orten		

Zahlen für 01.04.2007⁹

* Davon 750 tSM ausländische Brennelemente

**Davon 0,7 tSM ausländische Brennelemente

Besondere Probleme für Waste-Management

Die Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen und die Verwendung der dabei abgetrennten Kernbrennstoffe in neuen Brennelementen erfordern einen vielfältigen Umgang mit radioaktiven Stoffen. Die Folgen davon sind

- Strahlenbelastungen von Personal,
- umfangreiche Freisetzungen von radioaktiven Stoffen und dadurch zusätzliche Strahlenbelastungen von Bevölkerung und Umwelt,
- hohes Stör- und Unfallrisiko,
- hohes Proliferationsrisiko.

Am Standort Sellafield sind erhöhte Kontaminationen im Seewasser und am Strand festgestellt worden. Diese Kontaminationen haben zu hohen Aktivitäten in Tieren und Pflanzen geführt. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen wird auf erhöhte Krankheitszahlen der Kinder von in Sellafield Beschäftigten in der Umgebung von Sellafield hingewiesen. Es wird seit Jahren heftig diskutiert, ob die Anlagen Ursache dafür sind. Ein Kausalzusammenhang konnte bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden, er kann aber ebensowenig ausgeschlossen werden.

In Dounreay sind hohe Radioaktivitätskonzentrationswerte im anliegenden Küstengewässer festgestellt worden. Deshalb werden die endgelagerten Abfälle rückgeholt und neu behandelt.

Aufgrund der geringen Umweltschutzvorkehrungen werden 13.000.000 m³ kontaminierten Boden an Atomanlagenstandorten in Grossbritannien erwartet.

⁹ NDA + defra: The 2007 UK Radioactive Waste Inventory, Main Report, March 2008

Litauen

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Litauen existieren zwei vor kurzer Zeit stillgelegte Reaktoren in Ignalina.

Waste-Management-Konzept:

- Bestrahlte **Brennelemente** befinden sich im Reaktorlagerbecken.
- Nach Inbetriebnahme Überführung in trockenes Zwischenlager für ca. 50 Jahre.
- Zum weiteren Umgang mit den Brennelementen sollen Analysen erfolgen. Drei Optionen werden untersucht: Endlagerung in Litauen, Endlagerung oder Wiederaufarbeitung im Ausland.
- **Mittelradioaktive Abfälle** mit langlebigem Inventar sollen in ein Endlager in einer tiefen geologischen Formation.
- Flüssige **schwach- und mittelradioaktive Abfälle** werden bituminiert oder zementiert. Diese sowie feste schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit kurzlebigem Inventar sollen in einem oberflächennahen Endlager und schwachradioaktive Abfälle mit langlebigem Inventar im oberflächennahen Endlager mit zusätzlichen Vorkehrungen eingelagert werden.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** können freigegeben und weiterverwendet oder auf einer konventionellen Deponie abgelagert werden.

Status Endlager

Es gibt keine Entscheidung über den weiteren Umgang mit bestrahlten Brennelementen. Zurzeit wird an einer Machbarkeitsstudie gearbeitet, die eine Grundlage für die politische Entscheidung zu einer Option sein soll.

Für bituminierte Abfälle wird geprüft, ob – wie bereits ursprünglich vorgesehen – die derzeitige Lagerstätte am AKW-Standort als Endlager genutzt werden kann. Eine Entscheidung soll 2011 getroffen werden. Für alle anderen schwach- und mittelradioaktive Abfälle soll ein oberflächennahes Endlager errichtet werden. Der Standort ist festgelegt (Stabatiškė) und befindet sich wenige Kilometer von Ignalina entfernt. Gegenwärtig werden Sicherheitsanalysen durchgeführt.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Wie in den meisten Atomkraftwerken russischer Bauart wurden keine Zwischenlager für radioaktive Abfälle errichtet, sondern die Abfälle wurden nach unterschiedlicher Konditionierung (Verdampfer- und Bituminierungsanlage, Zementierungsanlage) sofort in ein am Standort befindliches Oberflächen-Endlager eingebracht. Für flüssige Abfälle wurden Tanks in den Erdboden eingelassen und diese nach Füllung hermetisch verschlossen. Feste radioaktive Abfälle wurden in Betonbunker eingelagert, die unter oder auf der Erdoberfläche eingerichtet sind. Nach den Baubeschreibungen handelt es sich bei den jetzt Zwischenlager genannten Bauwerken um solche, die ursprünglich als Endlager dienen sollten. Zumindestens teilweise wird die Nutzung als Endlager geprüft.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Ignalina	in Betrieb	1.502 tSM
	Zwischenlager (trocken)	nahe Ignalina	in Betrieb, wird ausgebaut	541,7 tSM
LILW langlebig	Zwischenlager	Ignalina	?	760 m ³ **
LILW flüssig	Zwischenlager-tanks	Ignalina	in Betrieb	3.746 m ³
LILW	2 Lagergebäude	Ignalina	teilweise in Betrieb	25.625 m ³ *
	Lager für bituminisierte Abfälle	Ignalina	in Betrieb; Prüfung auf Umwandlung in Oberflächenendlager	13.963 m ³ *
	Lager für zementierte Abfälle	Ignalina	in Betrieb	1.198,4 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Stabatiškė	Inbetriebnahme 2015 ?	-

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
VLLW	Deponie	keine Angaben		26.000 m ³ **

Zahlen für 01.03.2008 aus Joint Convention Report, außer:

* Zahlen für 01.01.2010 aus VATESI¹⁰

** Zahlen für 31.12.2004 aus 6th Situation Report¹¹

Besondere Probleme für Waste-Management

Für den weiteren Umgang mit bestrahlten Brennelementen gibt es kein Konzept und für die Konzepterstellung keinen Zeitplan. Eine Entscheidung zur Wiederaufarbeitung würde das Abschieben des Gefahrenpotenzials in einen Nicht-EU-Mitgliedsstaat mit geringeren Sicherheitsanforderungen (Russische Föderation) bedeuten. Bei einer Entscheidung für die direkte Endlagerung muss für die Brennelemente von einem länger als 50 Jahre dauernden Zwischenlagerzeitraum auf der Erdoberfläche ausgegangen werden.

Die Lagersituation für den größten Teil der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle aus dem Betrieb des Atomkraftwerkes ist desolat. Die Art der gegenwärtigen Abfalllagerung garantiert keine Rückhaltung der Radionuklide über einen längeren Zeitraum. Teilweise enden die Zwischenlagereignisse Ende 2010. Die Abfälle müssen rückgeholt und neu konditioniert werden. Dafür ist die Errichtung einer neuen Abfallbehandlungs- und Zwischenlageranlage geplant.

Niederlande

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In den Niederlanden wird ein Reaktor in Borssele betrieben. Für den Bau eines weiteren Reaktors hat im Oktober 2010 das Genehmigungsverfahren begonnen.

Weiterhin sind drei Forschungsreaktoren an den Standorten Petten und Delft in Betrieb.

¹⁰ VATESI: Nuclear Energy in Lithuania, Annual Report 2009

¹¹ Commission of the European Communities: Sixth Situation Report Radioactive Waste and Spent Fuel Management in the European Union, COM(2008)542 final, September 2008

In Almelo wird eine Urananreicherungsanlage betrieben.

Ein Leistungsreaktor ist stillgelegt und befindet sich im so genannten Sicheren Einschluss. Hierfür sind 40 Jahre vorgesehen.

Waste-Management-Konzept:

- Wiederaufarbeitung aller bis 2015 anfallenden **bestrahlten Brennelemente** in Sellafield und La Hague. Für den Umgang mit nach 2015 anfallenden Brennelementen wurde ein neuer Vertrag mit AREVA NC über die Wiederaufarbeitung in La Hague getroffen. Die daraus entstehenden Abfälle sollen bis 2034 in die Niederlande geliefert werden.
- Dabei anfallende und in den Niederlanden anzunehmende hochradioaktive verglaste und langlebige mittelradioaktive kompaktierte Abfälle sollen bis zu 100 Jahre zwischengelagert werden. .
- Eine Endlagerung soll ggf. rückholbar erfolgen.
- Langzeitzwischenlagerung des größten Teils der **Forschungsreaktor-Brennelemente**. Ein Teil der Brennelemente des Hochflussreaktors in Petten ist in die USA zurück transportiert worden.
- **Schwach- und mittelradioaktive Abfälle** werden zur zentralen Konditionierungsanlage am Zwischenlagerstandort transportiert und dort behandelt.
- Zwischenlagerung für ca.100 Jahre.
- In Bezug auf die Endlagerung dieser Abfälle wurde ein Forschungsprogramm aufgelegt. Wegen des hohen Grundwasserspiegels und der über längere Zeiträume nicht vorhersagbaren Höhe des Meerwasserspiegels kommen Oberflächen- oder oberflächennahe Endlagerung nicht infrage. Deshalb sollen langfristig alle radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Schichten endgelagert werden.
- **Abgereichertes Uran** aus der Anreicherungsanlage wurde bisher zum größten Teil zur Wiederanreicherung in die Russische Föderation gebracht.
- Zukünftig wird es in Süd-Frankreich zu Uranoxid konvertiert.
- Dann Zwischenlagerung in Vlissingen.

- **Sehr schwachradioaktiver Abfall** wird freigegeben.

Insgesamt wird für alle Arten radioaktiver Abfälle auch mit der Möglichkeit eines Internationalen oder Regionalen Endlagers gerechnet.

Status Endlager

Es wurde bisher kein Endlagerstandort gesucht. Allerdings wurde festgestellt, dass es ausreichende Salz- und Tonvorkommen für ein Endlager in den Niederlanden gibt. Das Ergebnis eines 2001 abgeschlossenen Forschungsprogramms war, dass die Endlagerung unter Strahlenschutzaspekten möglich und mit Rückholbarkeit der Abfälle in Salz oder Ton umsetzbar ist. Zu verschiedenen Aspekten der Endlagerung wird weiter geforscht, unter anderen auch durch Beteiligung an internationalen Projekten.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Die bestrahlten Brennelemente aus den Niederlanden wurden in La Hague und Sellafield und werden ab 2015 nur noch in La Hague wiederaufgearbeitet. Im Joint Convention Bericht 2009 gibt es keine Angaben zu den Mengen. Für Sellafield konnte aus anderen Quellen eine Brennelementmenge von 53 tSM ermittelt werden. In La Hague wurden bis 2006 ca. 300 tSM wiederaufgearbeitet. Die Gesamtmenge Menge dürfte allerdings größer sein.

Es gibt eine Abfallbehandlungsanlage für alle Abfallarten am Standort der Langzeit-Zwischenlager in Borsele.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Borssele	in Betrieb	561,6 tSM
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Petten, Delft	in Betrieb	0,14 tSM
HLW / bestr. BE	Langzeit-Zwischenlager (trocken)	Borsele	in Betrieb	29,6 m ³
	Zwischenlager	Petten	In Betrieb	keine Angabe
LILW	Reaktorlager	Borssele	in Betrieb	1.687 m ³

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LILW	Langzeit-Zwischenlager	Borsele	in Betrieb	9.078 m ³
VLLW	Keine Angaben über Menge und Verbleib der freigegebenen Abfälle			
Abgereichertes Urandioxid	Langzeit-Zwischenlager	Borsele	in Betrieb	1.845 m ³

Alle Zahlen für 31.12.2007 aus Joint Convention Bericht

Besondere Probleme für Waste-Management

Trotz der nicht vorhandenen Perspektive für den endgültigen Umgang mit den radioaktiven Abfällen wurde die Laufzeit des AKW in Borssele drastisch verlängert und ein weiteres AKW soll gebaut werden.

Die Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen und die Verwendung der dabei abgetrennten Kernbrennstoffe in neuen Brennelementen erfordern einen vielfältigen Umgang mit radioaktiven Stoffen. Die Folgen davon sind

- Strahlenbelastungen von Personal,
- umfangreiche Freisetzungen von radioaktiven Stoffen und dadurch zusätzliche Strahlenbelastungen von Bevölkerung und Umwelt,
- hohes Stör- und Unfallrisiko,
- hohes Proliferationsrisiko.

Die Berichte aus den Niederlanden enthalten keine Angaben zu Erfahrungen mit dem Zustand von Abfallbinden nach längerer Lagerung. Beispiele aus anderen EU-Mitgliedsstaaten zeigen, dass bereits nach Lagerzeiten von 20 Jahren – teilweise auch früher – starke Korrosions- oder andere nachteilige Erscheinungen aufgetreten sind. Bei einer Lagerzeit von 100 Jahren ist deshalb die Notwendigkeit umfangreicherer Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten zu erwarten, was jeweils mit Strahlenbelastungen von Personal und abgeschwächt von Bevölkerung verbunden ist.

Aus der Anreicherungsanlage in Almelo wurden große Mengen abgereichertes Uran als UF₆ zur Wiederanreicherung in die Russische Föderation gebracht. Etwa 4/5 des UF₆ (noch weiter abgereichert) bleibt in Russland. Die Verträge zwischen den Betreibern der Anlagen in den Niederlanden und in Russland enthalten keine binden-

den sicherheitstechnischen Anforderungen für den weiteren Umgang. Konzepte für den Umgang sind offenbar nicht vorhanden. Es ist von einer Langzeitlagerung in sicherheitstechnisch unzureichenden Behälter im Freien auszugehen. Freisetzungen aus einem Behälter können in der Umgebung katastrophale Folgen haben.

Durch die extensive Nutzung der Freigabe radioaktiver Abfälle in den konventionellen Bereich kann es insbesondere in einem kleinen Land wie den Niederlanden zu einer Erhöhung der Hintergrundstrahlung für die Bevölkerung kommen.

Rumänien

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Rumänien werden zwei Leistungsreaktoren betrieben, ein weiterer ist in Planung (alle Cernavoda).

Außerdem ist ein Forschungsreaktor in Betrieb und einer stillgelegt.

Ein Uranbergwerk ist in Betrieb, eines geplant und eines stillgelegt.

Waste-Management-Konzept:

- Zwischenlagerung **bestrahlter Brennelemente** in Becken der Leistungsreaktoren für 6 Jahre
- Zwischenlagerung der Brennelemente in Trockenlager für mindestens 50 Jahre.
- Endlagerung in tiefer geologischer Formation frühestens ab 2050.
- **Forschungsreaktor-Brennelemente** kommen nach der Zwischenlagerung auch in das Endlager oder werden in das Herkunftsland zurückgeschickt.
- Konditionierung und mindestens 50 Jahre Zwischenlagerung von langlebigen **schwach- und mittelradioaktiven Abfällen**.
- Endlagerung in tiefer geologischer Formation frühestens ab 2050.
- Zwischenlagerung kurzlebiger schwach- und mittelradioaktiver Abfälle.
- Endlagerung in oberflächennahem Endlager.

Status Endlager

Den verfügbaren Unterlagen (Joint Convention Bericht 2005 und Sixth Situation Report Radioactive Waste and Spent Fuel Management in the European Union) sind keine nennenswerten Aktivitäten zu einem Endlager für bestrahlte Brennelemente zu entnehmen.

Das oberflächennahe Endlager für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle soll 2014 in Betrieb gehen. Den verfügbaren Unterlagen ist allerdings keine Standortentscheidung zu entnehmen.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Cernavoda	in Betrieb	603 tSM
	Zwischenlager (trocken)		in Betrieb, wird ausgebaut	159 tSM
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Pitesti	in Betrieb	< 1 tSM
	Zwischenlager (trocken)		in Betrieb	
	Reaktor-Lagerbecken	Magurele	in Betrieb	< 1 tSM
BE / HLW	Endlager	Standort nicht festgelegt	Inbetriebnahme ?	-
LILW	Reaktorlager	Cernavoda	in Betrieb	179 m ³
	Zwischenlager	Cernavoda Pitesti Magurele	in Betrieb	304 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Standort nicht festgelegt	Inbetriebnahme 2014	-
U-haltige Abfälle	Halden + Schlammabsetzanlage	Brasov	geschlossen	4,5 Mio t

Alle Angaben aus Joint Convention Bericht für 2004

Besondere Probleme für Waste-Management

Es sind keine ernsthaften Anstrengungen zu Standortsuche und möglichst baldiger Einrichtung eines Endlagers für Brennelemente, hoch- und mittelradioaktive Abfälle zu erkennen.

Schweden

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Schweden werden 10 Leistungsreaktoren an drei Standorten und zwei Forschungsreaktoren an zwei Standorten betrieben.

Außerdem gibt es eine Brennelementfabrik und eine Uranreststoff-Recyclinganlage.

Drei Leistungs- und zwei Forschungsreaktoren sind in Stilllegung.

Waste-Management-Konzept:

- Lagerung **bestrahlter Brennelemente** in den Reaktorlagerbecken.
- Nach ausreichender Abklingzeit Transport und Lagerung für mindestens 30 Jahre im zentralen unterirdischen Zwischenlager (CLAB) in Hartgestein in 25 bis 30 m Tiefe.
- Endlagergerechte Verpackung in einer Anlage am Standort des noch zu errichtenden Endlagers.
- Endlagerung im Hartgestein in 400 bis 700 m Tiefe.
- Trotz Verfüllung und Verschließen des Endlagers soll eine Rückholung der Abfälle möglich sein.
- Bestrahlte **Forschungsreaktor-Brennelemente** werden teilweise zum Verbleib in die USA (Herkunftsland) verbracht. Die anderen Forschungsreaktor-Brennelemente werden entsprechend dem schwedischen Brennelement-Konzept behandelt.
- Konditionierung **schwach- und mittelradioaktiver Betriebsabfälle** an den Entstehungsstandorten bzw. brennbarer und metallischer Abfälle in Studsvik.

- Endlagerung aller schwach- und mittelradioaktiven Abfälle mit kurzlebigen Radioaktivitätsinventar im in Hartgestein errichteten Endlager SFR-1.
- Stilllegungsabfälle sollen ab 2020 in einem Erweiterungsbau des SFR endgelagert werden.
- Zwischenlagerung langlebiger schwach- und mittelradioaktiver Abfälle an den Entstehungsstandorten. Sie sollen in ein zentrales Zwischenlager überführt und später in ein eigenes Endlager kommen. Derzeit wird von einer Endlagerung dieser Abfälle nicht vor 2045 ausgegangen.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** werden entweder in Oberflächenendlagern an den AKW-Standorten bzw. an der Konditionierungsanlage in Studsvik endgelagert oder zur beliebigen Weiterverwertung sowie zur Ablagerung auf einer konventionellen Deponie freigegeben.

Status Endlager

Für bestrahlte Brennelemente wurde 2009 der Standort Östhammar in der Nähe des Atomkraftwerkes Forsmark festgelegt. Dort soll in 500 m Tiefe im Jahr 2025 das Endlager in Betrieb gehen. Umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden in einem Untertagelabor an anderem Standort in sehr ähnlichem Wirtsgestein durchgeführt.

Für langlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle gibt es bisher keine konkreten Planungen. Die Endlagerinbetriebnahme soll erst nach 2045 erfolgen.

Für die Abfallkategorien sehr schwach- bis mittelradioaktiv und kurzlebig sind Endlager in Betrieb.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Oskarshamn	in Betrieb	157 tSM
	Reaktor-Lagerbecken	Forsmark	in Betrieb	191 tSM
	Reaktor-Lagerbecken	Ringhals	in Betrieb	308 tSM

Atom­müll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Zentrales oberflächennahes Zwischenlagerbecken	Oskarshamn (CLAB)	in Betrieb, wird ausgebaut	4.676 tSM
	Endlager	Östhammar	Inbetriebnahme 2025	-
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Studsvik	in Betrieb	0,08 tSM
LILW lang­lebig	Zwischenlager	Studsvik, Simpevarp/Oskarshamn	in Betrieb	>1.100 m ³
	Endlager	Standort nicht festgelegt	Inbetriebnahme 2045	-
LILW kurz­lebig	Reaktorlager	Oskarshamn, Forsmark, Ringhals, Barsebäck	in Betrieb	? m ³
	Oberflächen­nahes Zwischenlager	Studsvik	in Betrieb	1.708 m ³
	Oberflächen­nahes Endlager	Forsmark	in Betrieb	31.768 m ³
VLLW	Deponie	Forsmark	in Betrieb	3.929 m ³
	Deponie	Oskarshamn	in Betrieb	7.346 m ³
	Deponie	Forsmark	in Betrieb	2.410 m ³
	Deponie	Studsvik	in Betrieb	1.151 m ³

Alle Zahlen für 31.12.2007 aus Joint Convention Bericht 2009.

Besondere Probleme für Waste-Management

Wichtigstes Element im Endlagerkonzept ist die Wirksamkeit technischer Barrieren über mehrere hunderttausend Jahre. Die Endlagerung kann aufgrund der geologischen Situation in Skandinavien nur in Hartgestein stattfinden. Hartgestein ist jedoch geklüftet und somit wasserführend. Über einen langen Zeitraum kann die Rückhal-

tung der Radionuklide aus dem Atommüll deshalb nur mit einem gegen Korrosion extrem stabilen Material gewährleistet werden. Als sehr korrosionsbeständig galt bisher Kupfer, aus dem der Endlagerbehälter für die Brennelemente gefertigt werden soll.

Im Jahr 2009 wurden in der Königlich Technischen Hochschule Stockholm Studienergebnisse veröffentlicht, die für die geochemischen Verhältnisse im geschlossenen Endlager einen sehr viel schnelleren Korrosionsmechanismus zeigen als nach bisherigem Kenntnisstand. Das bedeutet Freisetzungen in Zeiträumen, in denen auch weniger langlebige Radionuklide noch nicht in großem Umfang zerfallen sind.

Slowakische Republik

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In der Slowakischen Republik sind je zwei Reaktoren in Bohunice und Mochovce in Betrieb.

In Bohunice befinden sich drei Reaktoren in Stilllegung.

Eine experimentelle Bituminierungs- und eine Verbrennungsanlage sind ebenfalls in Stilllegung.

Waste-Management-Konzept:

- Lagerung **bestrahlter Brennelemente** bis zu 7 Jahre in den Reaktorlagerbecken.
- Danach 40 – 50 Jahre Zwischenlagerung in Behältern am AKW-Standort.
- Referenzszenario ist Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Geprüft werden aber auch Möglichkeiten zur Verbringung der Brennelemente ins Ausland zur dortigen Endlagerung oder Wiederaufarbeitung (ohne Rücknahme von Abfällen) und zur Nutzung internationaler oder regionaler Endlager.
- Pufferlagerung **schwach- und mittelradioaktiver Abfälle** in den Gebäuden der Reaktorblöcke.
- Konditionierung je nach Abfallart.

- Oberflächennahe Endlagerung. Abfälle, die die sicherheitstechnischen Annahmeanforderungen dieses Endlagers überschreiten, werden für längere Zeit an den Reaktorstandorten zwischengelagert. Sie sollen in einer tiefen geologischen Formation endgelagert werden.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** sollen in ein Oberflächenlager eingelagert oder in den konventionellen Bereich freigegeben werden.

Status Endlager

Im Rahmen eines Untersuchungsprogramms wurden vor längerer Zeit drei Regionen mit fünf potenziell als geeignet angesehenen Standorten für ein tiefes geologisches Endlager ermittelt. Das Untersuchungsprogramm wurde jedoch 2001 abgebrochen und 2008 von der Regierung eine neue Strategie vorgegeben. Darin ist auch die Endlagerung enthalten. Es gibt keine Festlegung, ob für den Fall einer Entscheidung für ein Slowakisches Endlager die fünf Standorte weiter untersucht werden sollen. Ein Zeitplan für das weitere Vorgehen ist, soweit öffentlich bekannt, nicht festgelegt.

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ist ein oberflächennahes Endlager in Mochovce in Betrieb.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

In der Vergangenheit wurde ein geringer Teil von den bestrahlten Brennelementen zur Wiederaufarbeitung in die Russische Föderation gebracht. Hierfür werden keine radioaktiven Abfälle in die Slowakische Republik geliefert.

Atom Müll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Bohunice, Mochovce	in Betrieb	Keine Angaben zugänglich
	Zwischenlagerbecken	Bohunice	in Betrieb	996 tSM
HLW	Reaktorlager	Bohunice	in Betrieb	167 Zellen *
LILW langlebig	Zwischenlager	?	?	50 m ³ ***
LILW flüssig	Reaktorlagertanks	Bohunice V-1, V-2, A-1	in Betrieb	5.087 m ³

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LILW flüssig	Reaktorlager-tanks	Mochovce	In Betrieb	2.003 m ³
LILW fest	Reaktorlager	Bohunice V-1, V-2, A-1	in Betrieb	5.712 m ³ + 389 pcs *
	Reaktorlager	Mochovce	in Betrieb	449 m ³
	Lager Kontaminierte Erde	Bohunice A-1	in Betrieb	6.819 m ³
	Oberflächen-Endlager	nahe Mochovce	in Betrieb	4.800 m ³ **
VLLW	Lager	keine Angaben	4.000 m ³ ***	

* Aus den vorliegenden Informationen lässt sich kein Volumen zuordnen.

** Dies sind die in der Konditionierungsanlage in Bohunice vor der Endlagerung behandelten AKW-Abfälle. Ob auch andere AKW-Abfälle in Mochovce endgelagert sind, ist den vorliegenden Informationen nicht zu entnehmen.

Alle Zahlen für 31.12.2007, außer

*** Aus 6th Situation Report für 31.12.2004.

Besondere Probleme für Waste-Management

In der Slowakischen Republik ist der Umgang mit bestrahlten Brennelementen nach deren Zwischenlagerung nicht festgelegt. Es ist davon auszugehen, dass dies die zielstrebige Suche nach einem Endlagerstandort und die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes behindert. Der ursprünglich vorgesehene Zeitpunkt für die Inbetriebnahme eines geologischen Endlagers war 2037. Dies ist jetzt auf unbestimmte Zeit verschoben. Ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wäre auch mit Wiederaufarbeitung für die dabei anfallenden radioaktiven Abfälle erforderlich.

Wie konfus die Slowakische Situation im Umgang mit bestrahlten Brennelementen ist, wird auch an der Vielzahl und der Art der Fragen anderer Staaten im Rahmen der dritten Überprüfungs-konferenz zur Joint Convention deutlich.

Sollte die Slowakische Regierung Wiederaufarbeitung in der Russischen Föderation in das Waste-Management-Konzept aufnehmen, so sind nicht nur die grundsätzlich in Kapitel 3.1.1 dieser Studie erläuterten sicherheitstechnischen Probleme relevant,

sondern es kommt das relativ geringe Sicherheitsniveau bei Atomanlagen in der Russischen Föderation dazu.

Die Stilllegung des Reaktors A-1 in Bohunice erfolgte nach zwei schweren Unfällen (INES 4). Die durch die Unfälle verursachten Freisetzungen von Radionukliden sorgten für eine starke Kontamination von Bauteilen, Strukturen und Umwelt.

Slowenien

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Slowenien wird ein Leistungsreaktor gemeinsam mit Kroatien (Krško) und ein Forschungsreaktor (Brinje) betrieben.

Das Uranbergwerk in Žirovski wurde 1990 stillgelegt.

Waste-Management-Konzept:

- Zwischenlagerung **bestrahlter Brennelemente** in Lagerbecken am AKW-Standort.
- Nach Stilllegung des Reaktors Überführung in ein trockenes Zwischenlager für 35 Jahre.
- Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in Slowenien, Kroatien oder einem Drittland.
- **Forschungsreaktor-Brennelemente** sollen zum Herkunftsland USA zurück geliefert werden.
- Behandlung **schwach- und mittelradioaktiver Abfälle** und Verpackung in Stahlfässer an den Standorten der Reaktoren sowie extern im Ausland in geringem Umfang.
- Zwischenlagerung der Abfälle in einem Lager am Entstehungsstandort.
- Endlagerung.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** werden unter Festlegung der Verwendung freigegeben.

Status Endlager

Die Entscheidung für das Konzept zur Endlagerung bestrahlter Brennelemente soll 2020 getroffen werden. Ein Endlager soll 2065 in Betrieb gehen. Für den Fall des Exports soll dieser zwischen 2066 und 2070 erfolgen.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Krško	in Betrieb	323 tSM
	Zwischenlager (trocken)	Krško	in Planung	-
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Brinje	in Betrieb	keine
BE / HLW	Endlager	Standort nicht festgelegt	Inbetriebnahme 2065	-
LILW	Reaktorlager	Krško	in Betrieb	2.209 m ^{3 1)}
	Zwischenlager	Brinje	in Betrieb	85 m ³
LILW kurzlebig	Oberflächen-nahes Endlager	Krško	Inbetriebnahme 2014	-
U-haltige Abfälle	Uranbergwerk-abfalllager	Žirovski	in Rekultivierung	1,9·10 ⁶ m ^{3 1)}
	Lager für Uran-erzaufbereitung-rückstände			7,21·10 ⁶ m ^{3 1)}

¹⁾ Daten zum 31.12.2009 aus Annual Report 2009

Besondere Probleme für Waste-Management

Der Reaktor in Krško wird gemeinsam mit Kroatien betrieben. Unterschiedliche Interessen und Verantwortlichkeiten der beiden Staaten können zu Problemen bei der Entwicklung eines Waste-Management-Konzepts führen, bspw. bei der Finanzierung des Waste-Managements und der Festlegung eines Endlagerstandortes.

Die Endlagerung der bestrahlten Brennelemente ist zwar vorgesehen, aber es sind keine Anstrengung für die Realisierung zu erkennen.

Spanien

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In Spanien werden 8 Leistungsreaktoren an 6 Standorten betrieben.

Es existieren eine Brennelementfabrik in Salamanca und das Forschungszentrum CIEMAT in der Nähe von Madrid.

Zwei Leistungs- und zwei Forschungsreaktoren befinden sich in Stilllegung.

Waste-Management-Konzept:

- Längere Lagerung **bestrahlter Brennelemente** in den externen Lagerbecken oder Behälterlager der AKW.
- Überführung in ein zentrales Zwischenlager und dortige Lagerung über 60 Jahre.
- Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Für einen bestimmten Zeitraum soll Rückholbarkeit gegeben sein.
- Zwischenlagerung langlebiger **schwach- und mittelradioaktiver Abfälle** in einem vorgesehen zentralen Oberflächenlager und spätere Endlagerung in tiefen geologischen Formationen.
- Konditionierung kurzlebiger schwach- und mittelradioaktiver Abfälle an den Reaktorstandorten oder am Endlagerstandort.

Endlagerung in Oberflächenendlager El Cabril nahe Córdoba. Der Endlagerstandort soll 300 Jahre nach Schließung aus der Aufsicht entlassen werden.

- Endlagerung kurzlebiger **sehr schwachradioaktiver Abfälle** in einem Oberflächenendlager nahe Córdoba mit geringeren Sicherheitsanforderungen.
- In-situ-Verwahrung langlebiger sehr schwachradioaktiver Abfälle in Bergwerken.

Status Endlager

Die Entscheidung über ein Endlager für bestrahlte Brennelemente, hochradioaktive sowie langlebige mittelradioaktive Abfälle wurde verschoben. Als Grund wird die langsame internationale Entwicklung angegeben.

In der Vergangenheit wurde aus Untersuchungen geschlossen, dass in Spanien grundsätzlich für ein Endlager geeignete tiefe geologische Formationen vorhanden sind. Dies wurde bejaht. Gegenwärtig werden lediglich Untersuchungen zu Möglichkeiten der Charakterisierung von Granit- und Tonformationen von über Tage durchgeführt. Generische Endlagerkonzepte für beide Gesteinsarten sollen entwickelt werden.

Endlager für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle und für sehr schwachradioaktive Abfälle sind in Betrieb.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Bis 1983 wurden bestrahlte Brennelemente des Reaktors Santa María de Garoña nach Großbritannien (145 tSM) und bis 1994 des Reaktors Vandellós I zur Wiederaufarbeitung nach Frankreich gebracht. Die Menge für Frankreich konnte nicht ermittelt werden.

Das abgetrennte Plutonium verblieb in Frankreich, das Uran ging in den Besitz des Wiederaufarbeiters über. Ab 2014 ist die Rückführung von in Frankreich entstandenen verglasten Abfällen geplant. Doch die technischen Spezifikationen dieser Abfallgebinde wurden bisher noch nicht von den spanischen Behörden akzeptiert. Auch ein Transport-/Lagerbehälter wurde noch nicht genehmigt und der Bau eines Lagers in Spanien wurde verzögert. Angaben zum Verbleib von Plutonium und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in Großbritannien liegen nicht vor.

Es gibt drei geschlossene Urananlagen. Eine Uranmühle und Uranerzaufbereitungsanlage werden derzeit abgebaut, die Stilllegung einer weiteren Uranerzaufbereitungsanlage ist abgeschlossen.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Cáceres	in Betrieb	994 tSM
	Reaktor-Lagerbecken	Tarragona	in Betrieb	1.312 tSM
	Reaktor-Lagerbecken	Valencia	in Betrieb	598 tSM
	Reaktor-Lagerbecken	Burgos	in Betrieb	326 tSM
	Reaktor-Lagerbecken	Guadalajara	in Betrieb	296 tSM
	Behälterlager	Guadalajara	in Betrieb	923 tSM
BE / HLW / ILW langlebig	Zwischenlager (trocken)	Valencia	Inbetriebnahme 2012	-
	Endlager	Standort nicht festgelegt	Inbetriebnahme 2050 ?	-
Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LILW	Reaktorlager	Cáceres	in Betrieb	1.684 m ³
	Reaktorlager	Tarragona	in Betrieb	3.981 m ³
	Reaktorlager	Valencia	in Betrieb	1.784 m ³
	Reaktorlager	Burgos	in Betrieb	1.061 m ³
	Reaktorlager	Guadalajara	in Betrieb	690 m ³
	Lager	Juzbado	in Betrieb	491 m ³
	Lager	Madrid	in Betrieb	10 m ³
	Zwischenlager	Córdoba	in Betrieb	? m ³
	Oberflächenendlager	Córdoba (El Cabril)	in Betrieb	55.988 m ³
VLLW	Oberflächenendlager	Córdoba	in Betrieb	? m ³

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Uranhaltige Abfälle	Minen + Halden + Schlammab- setzanlage	Salamanca	in Rekultivierung	80,3 Mio. t
		Badajoz	stillgelegt + überwacht	6,6 Mio. t
		Jaén	stillgelegt + überwacht	1,2 Mio. t

Alle Zahlen für 31.12.2007 aus Joint Convention Report 2009.

Besondere Probleme für Waste-Management

Die Endlagerstandortsuche und Entscheidungen zur Endlagerung von bestrahlten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen wurden in Spanien verschoben. Damit steht für den Umgang mit diesem Abfall langfristig nur die oberirdische Zwischenlagerung zur Verfügung.

Der langfristige Umgang mit radioaktiven Graphitabfällen aus dem Abbau des Reaktors Vandellos I ist ungeklärt.

Tschechische Republik

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In der Tschechischen Republik werden vier Reaktoren in Dukovany und zwei Reaktoren in Temelin betrieben. Der begonnene Bau zweier weiterer Reaktorblöcke in Temelin wurde im Oktober 2010 vorerst ausgesetzt.

Darüber hinaus gibt es einen Forschungsreaktor in Rez und noch zwei kleine kritische Einheiten.

Eine Uranmine und eine Erzaufbereitungsanlage sind außerdem in Betrieb.

Waste-Management-Konzept:

- Zurzeit bevorzugtes Konzept ist die längerzeitige Zwischenlagerung von **bestrahlten Brennelementen** aus Leistungsreaktoren in Behälter-Zwischenlagern an den AKW-Standorten und Inbetriebnahme eines zentralen geologischen Endlagers für bestrahlte Brennelemente und andere radioaktive Abfälle nach

2065. In der Diskussion sind auch noch Wiederaufarbeitung im Ausland und regionale Endlager.

- Die **Forschungsreaktor-Brennelemente** werden in der Russischen Föderation wiederaufgearbeitet und die dabei anfallenden hochradioaktiven Abfälle zurückgenommen.
- Feste **mittelradioaktive Abfälle** werden vorerst nicht konditioniert. Sie werden am Reaktor oder zentral in BAPP in Dukovany zwischengelagert. Über den Umgang mit ihnen soll im Rahmen der Stilllegung der Reaktoren entschieden werden.
- Feste, nicht brennbare **schwachradioaktive Abfälle** aus dem Reaktorbetrieb werden vorort verpresst und zeitweise zwischengelagert. Brennbare Abfälle werden extern verbrannt. Die Abfälle kommen in das in Betrieb befindliche oberflächennahe Endlager in Dukovany.
- Flüssige radioaktive Abfälle werden am Entstehungsort in Tanks zwischengelagert. Es folgt eine Verfestigung. Wenn die entstehenden schwach- und mittelradioaktiven Abfälle die radiologischen Annahmebedingungen des Endlagers einhalten, werden sie in Dukovany endgelagert.
- **Sehr schwachradioaktive Abfälle** werden in den konventionellen Bereich freigegeben, sofern ihr Inventar die festgesetzten Werte unterschreitet.
- **Abfälle aus der Urangewinnung** lagern in eigenen Oberflächenlagern (Halden und Absetzbecken). Sie unterliegen in der Tschechischen Republik nicht dem Atomrecht.

Status Endlager

Für bestrahlte Brennelemente und alle Abfälle, die nicht in das oberflächennahe Endlager eingelagert werden können, ist die Errichtung eines Endlagers in Granit vorgesehen. Zunächst wurden hierfür 30 potenzielle Standorte nach vorhandenen geologischen Daten zur Auswahl vorgeschlagen. Wegen Protesten an den Standorten wurde bis 2009 ein Moratorium erlassen. Ab 2010 sollen geologische Untersuchungen von 7 Standorten beginnen. Im Jahr 2015 soll dies auf zwei Standorte eingeeengt werden. Mit der Inbetriebnahme nach der endgültigen Standortfestlegung wird nach 2065 gerechnet.

Ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ist in Betrieb. Bestimmte Teile der mittelradioaktiven Abfälle dürfen dort jedoch nicht endgelagert werden. Hierfür muss noch ein Endlagerstandort festgelegt werden.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Dukovany	in Betrieb	284 tSM
	Zwischenlager (trocken)	Dukovany	voll	603 tSM
	Zwischenlager (trocken)	Dukovany	in Betrieb, wird ausgebaut	80 tSM
	Reaktor-Lagerbecken	Temelin	in Betrieb	204 tSM
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Řež	in Betrieb	32 BE
	Lagerbecken	Řež	in Betrieb	Keine BE
HLW	Reaktor-Lagerbecken	Řež	in Betrieb	leer
BE / HLW	Endlager	Standort nicht festgelegt	Inbetriebnahme nach 2065	-
LILW flüssig	Reaktorlager-tanks	Dukovany	in Betrieb	2.111 m ³
	Reaktorlager-tanks	Temelin	in Betrieb	309 m ³
	Reaktorlager-tanks	Řež	in Betrieb	210,5 m ³
LILW fest	Reaktorlager	Dukovany	in Betrieb	507 Mg * 40 Fässer *
	Reaktorlager	Temelin	in Betrieb	119 Mg * 2,6 m ³
	Reaktorlager	Řež	in Betrieb	837 m ³

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
LILW fest	Oberflächen-nahes Endlager	Dukovany	in Betrieb	5.930 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Litoměřice	nicht mehr für Abfälle aus Atomanalgen	7.300 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Beroun	geschlossen	330 m ³
VLLW	Keine Angaben über Mengen und Verbleib der freigegebenen Abfälle			
U-haltige Abfälle	Halden + Schlammabsetzanlage	Stráž, Dolní Rožínka	in Rekultivierung	? m ³

Alle Zahlen für 31.12.2007 aus Joint Convention Report 2009.

* Aus den vorliegenden Informationen lässt sich kein Volumen zuordnen.

Besondere Probleme für Waste-Management

Die bestrahlten Brennelemente müssen über einen sehr langen Zeitraum zwischengelagert werden, da ihr endgültiger Verbleib in einem Endlager erst nach 2065 vorgesehen ist. In welchem Zustand sich der Atommüll dann befindet bzw. welches Gefahrenpotenzial er dann hat, ist nicht vorhersagbar.

Ungarn

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

Es werden 4 Reaktorblöcke am Standort Paks betrieben.

Darüber hinaus gibt es einen Forschungs- und einen Trainingsreaktor in Budapest.

Waste-Management-Konzept:

- Abklinglagerung **bestrahlter Brennelemente** in den Reaktorlagerbecken.
- Anschließend Zwischenlagerung in Standortnähe in einem modularen Trockenlager.

- Ob diese Brennelemente wiederaufgearbeitet oder direkt endgelagert werden sollen, ist noch nicht entschieden. Referenzszenario ist jedoch die Direkte Endlagerung.
- Zwischenlagerung von **Forschungsreaktor-Brennelementen** am Standort.
- Für den Umgang sind gegenwärtig drei Optionen im Gespräch, die Rückführung in das Herkunftsland (Russische Föderation), der gemeinsame Umgang mit den Paks-Brennelementen oder Langzeitlagerung am Standort in Budapest.
- Flüssige **schwach- und mittelradioaktive Abfälle** werden am Entstehungsstandort in Lagertanks gelagert. Die Notwendigkeit ihrer Konditionierung wird von der benötigten Lagerkapazität abhängig gemacht. Mindestens ein Teil dieser Abfälle soll erst im Rahmen der Stilllegung der Reaktoren konditioniert werden.
- Feste schwach- und mittelradioaktive Abfälle werden am Entstehungsstandort behandelt und, soweit die Kapazität reicht, zwischengelagert. Ein weiteres Zwischenlager wird am Standort des zukünftigen oberflächennahen Endlagers betrieben. Das Endlager soll bis zum Abschluss der Stilllegung aller Reaktoren in Betrieb bleiben.
- In Ungarn werden **sehr schwachradioaktive Abfälle** für den konventionellen Umgang freigegeben.

Status Endlager

Seit 1995 wird ein Programm zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (einschließlich bestrahlter Brennelemente) und langlebiger radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen verfolgt. Als mögliche Endlagerstandortregion wurde die Boda Tonformation im Mecsek-Höhenzug identifiziert. Dort soll zunächst ein Untertagelabor eingerichtet werden. Die Inbetriebnahme des Endlagers ist 2064 vorgesehen.

Im Jahr 1976 wurde in Püspökszilágy ein Oberflächen-Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Betrieb genommen. In geringem Umfang wurden auch Betriebsabfälle aus Paks eingelagert. Eigentlich ist es aber für radioaktive Abfälle aus anderen Bereichen als der Atomenergienutzung gedacht. Ein oberflächennahes Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus der Atomenergienutzung in Hartgestein wird gegenwärtig in der Nähe von Bábaapáti errichtet und soll 2012 in Betrieb gehen.

Waste-Management-Anlagen und vorhandene Abfallmengen:

Bis 1998 wurden 2.331 bestrahlte Brennelemente mit 273 tSM in die Russische Föderation / Sowjet-Union zur Wiederaufarbeitung gebracht. Eine Rückführung der bei der dortigen Wiederaufarbeitung dieser Brennelemente angefallenen radioaktiven Abfälle ist nicht vorgesehen.

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
Bestrahlte Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Paks	in Betrieb	223,2 tSM
	Zwischenlager (trocken)	Paks	in Betrieb, wird ausgebaut	719,7 tSM
HLW	Reaktorlager	Paks	in Betrieb	92,4 m ³
Bestrahlte Forschungs-Brennelemente	Reaktor-Lagerbecken	Budapest	in Betrieb	0,37 tSM
BE / HLW	Endlager	Mecsek-Höhenzug	Inbetriebnahme 2064	-
LILW langlebig flüssig	Reaktorlager-tanks	Paks	in Betrieb	975 m ³
LIHLW flüssig	Reaktorlager-tanks	Paks	in Betrieb	150 m ³
LILW flüssig	Reaktorlager-tanks	Paks	in Betrieb	5.826 m ³
LILW	Reaktorlager	Paks	in Betrieb	1.687 m ³
	Zwischenlager	Bátaapáti	in Betrieb	320 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Püspökszilágy	in Betrieb für Institutional Waste	5.040 m ³
	Oberflächen-nahes Endlager	Bátaapáti	Inbetriebnahme 2012	-

Atommüll	Lagertyp	Lagerort	Status	Lagermenge
VLLW	Keine Angaben über Mengen und Verbleib der freigegebenen Abfälle			
U-haltige Abfälle	Halden + Schlammabsetzanlage	Pecs	in Rekultivierung	29,6·10 ⁶ m ³

Mengenangaben zu flüssigen Abfällen für 31.12.2007 aus Joint Convention Bericht 2009.

Mengenangaben zu allen anderen Abfällen für 01.01.2010¹²

Besondere Probleme für Waste-Management

Es befinden sich 30 zerstörte Brennelemente aus einem schweren Störfall 2003 in Paks in 68 Lagerbehältern.

Die Sicherheitsanforderungen (z.B. für Zwischenlager) sind deutlich geringer als in westlichen Staaten (z.B. Hochwasser, Langzeitlagerung flüssiger Abfälle).

In das in Betrieb befindliche aber fast gefüllte Oberflächenendlager wurden mindestens in den ersten Jahren Abfälle ohne jegliche Annahmebedingungen eingelagert. Deshalb wurden Endlagerbereiche wieder geöffnet und die Abfälle geborgen. Nach ihrer erneuten Behandlung und einer Ertüchtigung der Lagerstrukturen werden sie wieder eingelagert.

4.2 Strategien in Russischer Föderation und USA

Russische Föderation

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In der Russischen Föderation werden 32 Leistungsreaktoren und eine Vielzahl von Anlagen zur Versorgung dieser Reaktoren betrieben. In den kommenden Jahren sollen sowohl die installierte Kraftwerkskapazität als auch die Urangewinnungs- und Uranverarbeitungskapazitäten erhöht werden.

¹² Public Limited Company for Radioactive Waste Management: 10th Medium and Long-Term Plan of Public Limited Company for Radioactive Waste Management (RHK Kft., Mai 2010)

Der Betrieb von Wiederaufarbeitungsanlagen mit über 90 Einrichtungen sorgt für einen großen Atommüllanfall.

Es werden 23 Forschungsreaktoren betrieben.

Waste-Management-Konzept:

Die bestrahlten Brennelemente werden zunächst 3 bis 5 Jahre im Reaktorlagerbecken gelagert. Je nach Reaktortyp kommen die Brennelemente dann zur Wiederaufarbeitung oder in ein Zwischenlager. Zwischenlager werden zentral und an Reaktorstandorten betrieben. Es handelt sich dabei um Lagerbecken. In Zukunft soll verstärkt die trockene Zwischenlagerung eingeführt werden.

Eine Endlagerung von bestrahlten Brennelementen ist nicht vorgesehen. Es sind auch keine intensiveren Untersuchungen hierzu bekannt. Das gilt jedoch auch für hochradioaktive und andere Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.

Status Endlager

In der Vergangenheit wurden in Russland radioaktive Abfälle in Bohrlöcher verpresst. Nach zunehmenden öffentlichen Protest sowie der Kritik der IAEA an dem nicht vorhandenen gestaffelten Barrierensystem wurde diese Technologie eingestellt.

Besondere Probleme für Waste-Management

Die Wiederaufarbeitung russischer und ausländischer Leistungsreaktor-Brennelemente findet in Mayak statt. Es handelt sich um eine ursprünglich hauptsächlich militärisch genutzte Anlage. Hier wurde zum Beispiel das Plutonium für die erste Sowjetische Atombombe produziert. Auch heute haben bestimmte Anlagenteile bzw. -einrichtungen noch militärische Aufgaben. Damit existiert keine klare Trennung zwischen militärischen und zivilen Bereich.

Eine wissenschaftliche Untersuchung der russischen und norwegischen Regierung von 1997 kommt zu dem Ergebnis, dass seit 1948 von Mayak insgesamt $8,9 \cdot 10^{18}$ Bq der radioaktiven Isotope Sr-90 und Cs-137 in die Umwelt abgegeben wurden.

Auf der Anlage gab es mehrere schwere Unfälle, die zu einer starken Kontamination in der Umgebung führten:

-
- Im Jahr 1957 explodierte ein Lagertank mit Wiederaufarbeitungsabfällen, nachdem über längere Zeit dessen Kühlung ausgefallen war. Es handelt sich um einen Unfall der auf der INES-Skala mit 6 bezeichnet würde.
 - Im Jahr 1967 fiel während einer Dürreperiode ein See auf dem Anlagengelände trocken, der als offenes Abfalllager benutzt wurde (durch Einleitung von flüssigen Abfällen). Das radioaktiv verseuchte Sediment des Sees wurde durch einen Wirbelwind abgetragen und in die Umgebung transportiert.
 - Im Jahr 2007 wurde ein Lagertank der Wiederaufarbeitungsanlage für radioaktive Abfälle undicht. Der flüssige Abfall lief aus dem offenbar im Freien stehenden Tank aus und verteilte sich auf einer Straße. An diesem Ereignis zeigt sich, dass selbst elementarste Sicherheitsvorkehrungen wie eine Bodenwanne in Mayak nicht gegeben sind.
 - Im August 2010 näherten sich die großflächigen Wald- und Torfbrände der Anlage, so dass von den Behörden der Notstand ausgerufen wurde. Die Anlage selbst war dann glücklicherweise nicht betroffen, aber durch die nach wie vor in Folge der Unfälle und sonstigen Freisetzungen relativ stark kontaminierte Umgebung dürften erneut radioaktive Stoffe durch den Brand mobilisiert worden sein.

Insgesamt ist festzustellen, dass es in der Russischen Föderation kein tragfähiges und mit Nachdruck verfolgtes Konzept für den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen gibt.

USA

AKW und andere Verursacher von Primärabfällen:

In den USA werden 104 Leistungsreaktoren und eine Vielzahl von Anlagen zur Versorgung dieser Reaktoren betrieben.

Ein weiterer großer Abfallverursacher ist die geschlossene zivile Wiederaufarbeitungsanlage in West Valley.

Darüber hinaus gibt es große zivile und militärische Forschungseinrichtungen.

Waste-Management-Konzept:

Das Waste-Management für die zivile und die militärische Atomenergienutzung sind weitgehend voneinander getrennt. Hier wird nur das vorwiegend zivile Waste-Management beschrieben.

Bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren werden in den Lagerbecken der Atomkraftwerke zwischengelagert. Für etwa die Hälfte der Reaktoren existieren zusätzlich vom Reaktorbetrieb unabhängige Zwischenlager an den Standorten. Eine künftige Lagerkapazitätserweiterung soll bevorzugt in Form von trockener Lagerung in Büchsen erfolgen, die ihrerseits in Betonsilos oder Behälter lagern.

Bestrahlte Brennelemente aus Forschungsreaktoren in den USA und aus dem Ausland (auch aus EU-Mitgliedsstaaten) werden in zentralen Zwischenlagern an den Standorten Savannah River Site und Idaho National Laboratory zwischengelagert.

Die Brennelemente aus Leistungsreaktoren (auch MOX-Brennelemente mit Waffenplutonium aus den Abrüstungsvereinbarungen mit der Russischen Föderation) und aus Forschungsreaktoren sollen in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Damit ist gegenwärtig keine zivile Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente vorgesehen. Die gegenwärtige Regierung der USA hat eine Kommission (Blue Ribbon Panel) eingesetzt, das die verschiedenen Waste-Management Optionen neu bewerten und 2011 einen entsprechenden Bericht abliefern soll.

Die aus früheren Zeiten stammenden hochradioaktiven Abfälle aus der zivilen Wiederaufarbeitung sollen im gleichen Endlager wie bestrahlte Brennelemente eingelagert werden.

Das Endlager soll über 100 Jahre ab Einlagerungsbeginn offen bleiben. Das heißt ca. 50 Jahre soll eingelagert werden und weitere 50 Jahre müssen die Einlagerungsbereiche zugänglich sein.

In den USA gibt es keine Kategorie mittelradioaktive, sondern vier unterschiedliche Kategorien für schwachradioaktive Abfälle. Alle schwachradioaktiven Abfälle müssen konditioniert werden. Die Zwischenlagerung erfolgt bis zum Abtransport ausreichend großer Mengen zur Endlagerung in der Regel am Standort des Anfalls. Die Kategorie Abfälle mit dem größten, auch langlebige Radionuklide enthaltenden Inventar wird zurzeit für einen längeren nicht festgelegten Zeitraum zwischengelagert. Über die Art

der Endlagerung ist noch nicht entschieden. Die anderen schwachradioaktiven Abfälle werden in oberflächennahen Endlagern bis zu 30 m unter der Erdoberfläche endgelagert. Sehr schwachradioaktive Abfälle werden auch in anderen Schadstoffdeponien abgelagert.

Status Endlager

Seit 1987 wurde auf Beschluss des amerikanischen Kongresses Yucca Mountain als Standort für ein Endlager für bestrahlte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle untersucht und ausgebaut. Im Frühjahr 2010 entschied die US-Regierung das Projekt nicht weiter zu verfolgen und Yucca Mountain zu verfüllen.

Transuran-haltige Abfälle (TRU) aus Forschung, Entwicklung und Produktion von Atomwaffen werden seit 1999 in 655 m Tiefe im Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) ein- bzw. endgelagert.

Gegenwärtig sind in den USA drei oberflächennahe Endlager für die schwachradioaktiven Abfallkategorien in Betrieb.

Besondere Probleme für Waste-Management

Die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle muss neu begonnen werden. Die Behörden haben trotz Zweifel an der sicherheitstechnischen Eignung des Standortes, an den integral sehr langen Transportwegen und gesellschaftspolitischer Probleme Jahrzehnte am Standort Yucca Mountain festgehalten.

In Bezug auf die seit längerer Zeit durchgeführte Endlagerung des militärischen Atommülls im WIPP gibt es in den letzten Jahren neue Diskussionen zur Stabilität der Salzformationen bzw. der Rückhaltefähigkeit bei Freisetzung von Radionukliden.

Einer der drei Endlagerbetriebe für schwachradioaktive Abfälle verweigert seit Juli 2008 die Annahme von Abfällen aus drei US-Bundesstaaten. In diesen drei Staaten müssen die Abfallerzeuger Methoden zur Langzeitzwischenlagerung etablieren. Ein neues oberflächennahes Endlager befindet sich gegenwärtig im Genehmigungsverfahren. Vier oberflächennahe Endlager sind bereits stillgelegt, weil Umweltauflagen und Auflagen nicht eingehalten werden konnten.

5. Zusammenfassung

In den 27 EU-Mitgliedstaaten wurden bis Ende 2007 über 2.000.000 m³ radioaktive Abfälle (ohne Uranminen- und Uranaufbereitungsrückstände) endgelagert. Die EU-Mitgliedsstaaten mit den größten Atommüllmengen sind Großbritannien und Frankreich.

Von den 16 die Atomenergie nutzenden Staaten der EU sind nur in sieben Staaten ein oder mehrere Endlager für schwach- oder schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Betrieb:

- In zwei Staaten für AKW-Abfälle (Finnland, Tschechien),
- In einem Staat für schwachradioaktive Abfälle (Großbritannien)
- In vier Staaten für schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit kurzen Halbwertszeiten (Frankreich, Schweden, Spanien, Slowakische Republik).

In keinem Staat existiert ein Endlager für hochradioaktive Abfälle und bestrahlte Brennelemente.

In den EU-Mitgliedstaaten lagerten Ende 2009 folgende Abfallmengen:¹³

- Ca. 250.000 m³ sehr gering radioaktive Abfälle (wobei die meisten EU-Mitgliedsstaaten im Joint Convention Bericht keine Mengen angegeben haben),
- Mehr als 550.000 m³ schwach und mittelradioaktive Abfälle (laut Europäischer Kommission ein großer Teil ohne aktuelle Endlagerperspektive),
- Ca. 35.000 m³ hochradioaktive Abfälle (laut Europäischer Kommission ohne aktuelle Endlagerperspektive),
- Ca. 48.000 tSM Brennelemente.

In der EU werden bis 2020 zusätzlich ca. 2.000.000 m³ Abfälle erwartet.

¹³ abgeschätzt auf Grundlage der vorliegenden Angaben für 2009 und den Angaben für 2007 in den Joint Convention Berichten

Diese Abfälle müssen zum großen Teil über viele Jahrzehnte zwischengelagert werden. Die sicherheitstechnischen Anforderungen sind in vielen Fällen zweifelhaft. Abgesehen von den ohnehin durch die Radioaktivität verursachten Risiken, bilden Terrorgefahren und Extremwetterlagen einen zusätzlichen Risikobeitrag.

Wie sich zunehmend zeigt, ist jedoch auch der als am sichersten scheinende Verbleib für den Atommüll, die Endlagerung in geologischen Formationen, mit Problemen verbunden. Die im deutschen Endlager Asse erkannten Gefahren einer möglichen Freisetzung der endgelagerten radioaktiven Stoffe in die Biosphäre sind nur ein Beispiel. Hier war die behauptete Langzeitsicherheit bereits nach 40 Jahren zuende.

Kein Ausweg sind Technologien wie Wiederaufarbeitung und Transmutation. Nach heutigen Kenntnissen wird trotzdem eine Endlagerung, für die ein Langzeitsicherheitsnachweis notwendig ist, erforderlich sein. Es erhöhen sich durch den vielfältigen Umgang mit den radioaktiven Abfällen aber die Risiken für Stör- und Unfälle, die Strahlenbelastungen für Personal und Bevölkerung und die Möglichkeiten zum militärischen Missbrauch. Die Transmutation wird – wenn überhaupt – frühestens in 50 Jahren einsetzbar sein. Bis dahin sind weit über 1.000.000 m³ Atommüll angefallen, der auf diese Weise behandelt werden müsste, sowie eine grosse Menge hochradioaktiver Abfälle, die bereits konditioniert und nicht mehr behandelbar sind (z.B. verglaste Abfälle). Das zeigt, daß dies für die EU-Mitgliedsstaaten insgesamt kein Ansatz zur Lösung des bereits heute vorhandenen Problems sein kann.

Es kommt hinzu, dass die meisten Staaten mit Wiederaufarbeitung im Waste-Management-Konzept, diese nicht im eigenen Land durchführen, sondern die Risiken exportieren. Insbesondere die Wiederaufarbeitung außerhalb der Europäischen Union, in der Russischen Föderation, sollte umgehend gestoppt werden. Die Sicherheitsanforderungen sind zum Teil noch unzureichender als in Frankreich und Großbritannien.

Ergebnis:

Auch nach über 50 Jahren Atomenergienutzung hat kein Staat eine umgesetzte, funktionierende Entsorgungsstrategie für alle Arten radioaktiver Abfälle entwickelt. Eine Lösung der mit dem Waste-Management verbundenen Probleme ist auch durch eine Richtlinie für den Umgang mit den radioaktiven Abfällen in der EU nicht möglich.