



DER WELT- ATOMMÜLL- BERICHT

Fokus Europa.



PARTNER UND FÖRDERER

ÖKOLOGIE & FRIEDEN

Altner-Combecher Stiftung



HEINRICH BÖLL STIFTUNG



Dieser Bericht wäre ohne die großzügige finanzielle Unterstützung einer vielfältigen Gruppe von Organisationen und FreundInnen nicht möglich gewesen. Besonders genannt werden müssen (hier in alphabetischer Reihenfolge) die Altner-Combecher-Stiftung, die Bäuerliche Notgemeinschaft Lüchow-Dannenberg, der Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND), die Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V., die Climate Core Group und Abgeordnete der Fraktion Greens/EFA im Europäischen Parlament, die Heinrich-Böll-Stiftung und ihre Büros in Berlin, Brüssel, Paris, Prag und Washington DC, der Verein KLAR! Schweiz, die Schweizer Energie Stiftung sowie Annette und Wolf Römmig, Rebecca Harms. Vielen Dank an alle!



VORWORT

Im Herbst 2019 wurde die erste Ausgabe des **WELT-ATOMMÜLL-BERICHTS (The World Nuclear Waste Report / WNWR)** in Berlin der Öffentlichkeit vorgestellt. Ein knappes Jahr später ist es möglich, diesen Bericht auch in deutscher Übersetzung zu präsentieren. Wir hoffen, dass die zusammengetragenen Informationen in Deutschland und in anderen Ländern nützlich sind, in denen mit den großen, wachsenden und bisher unbewältigten Herausforderungen radioaktiver Abfälle umgegangen werden muß. Der internationale Austausch ist auch deshalb notwendig, weil noch rund 70 Jahre nach Beginn der militärischen und zivilen Nutzung der Atomenergie kein Land es geschafft hat, ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb zu nehmen. Aufgegebene oder havarierte Endlagerprojekte und Neuanfänge der Suche nach geeigneten tiefen geologischen Lagern, die in diesem Bericht beschrieben werden, zeigen, dass es gute Gründe für internationalen Austausch gibt.

In Deutschland wurde nach Fukushima entschieden, die Nutzung der Atomkraft zur Energieerzeugung zu beenden. In der Folge wurde ebenfalls entschieden, die Arbeit am tiefen geologischen Endlager im Salzstock von Gorleben zu unterbrechen. Der Ort und der Salzstock darunter waren 1977 als Standort für ein Nukleares Entsorgungszentrum und ein unterirdisches Endlager für hochradioaktive Abfälle bestimmt worden. Inzwischen wurde ein Gesetz zur Endlagersuche (Standortauswahlgesetz – StandAG) verabschiedet und ein neues Such- und Auswahlverfahren eingeleitet, mit dem die Entscheidung über die Geologie und den Standort eines zukünftigen Endlagers für hochradioaktive Abfälle vorbereitet werden soll. Im Herbst 2020, mehr als vier Jahrzehnte nach der ursprünglichen Wahl Gorlebens, wird die Diskussion über Atommüll und Endlagerung in Deutschland neu beginnen. Ein Bericht über den Stand des neuen Suchverfahrens und eine erste Auswahl der Regionen, deren Geologie für die Endlagerung geeignet sein könnte, wird die Grundlage dieser Diskussion sein.

Wir hoffen, dass auch der **WNWR** für die schwierige Phase der Information und Meinungsbildung nützlich sein wird. Die meisten derjenigen, die das Verfahren jetzt verantworten oder sich daran beteiligen, werden die Inbetriebnahme eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland wohl nicht erleben. Kaum jemand unter den Fachleuten rechnet damit, dass ein Endlager für hochradioaktive Abfälle vor Ende des Jahrhunderts betriebsbereit sein kann. Zwischen dem Beginn eines Suchverfahrens für ein atomares Endlager und dem möglichen Betriebsbeginn liegen etliche Jahrzehnte. Die Arbeiten zur Vorbereitung, Konzeption und Verwirklichung eines Endlagers, in dem hochradioaktive Abfälle für mehrere Hunderttausend Jahre sicher eingeschlossen werden sollen, werden sich über mehrere Generationen erstrecken. Die besondere Gefährlichkeit von Atommüll, die extrem lange Spanne von heute bis zu einer Betriebsgenehmigung und die damit verbundenen Generationenwechsel kennzeichnen die besonderen Herausforderungen der Endlagersuche. Die beste Antwort darauf scheint bisher zu sein, die Verfahren auf der Grundlage wissenschaftlicher Kriterien, ergebnisoffen, fehlerfreundlich und mit weitgehender Bürgerbeteiligung zu organisieren.

Die tiefengeologische Endlagerung wird trotz des Scheiterns etlicher nationaler Suchverfahren und einzelner Projekte international als präferierte Option verfolgt. Sie soll den sicheren Einschluss für 1 Million Jahre und die Rückholbarkeit der Abfälle für definierte Zeiträume, darüber hinaus die Wiederauffindbarkeit und Bergbarkeit gewährleisten. Die Sorglosigkeit und Hybris, mit der die Atomindustrie und auch Regierungen das Problem des Atommülls in Deutschland und in anderen Ländern verdrängt und aufgeschoben haben, zerstörte viel von dem Vertrauen unter Bürgerinnen und Bürgern, das für eine

Lösung gebraucht wird. Der Ausstieg aus der Atomenergie erscheint heute als eine Voraussetzung, Vertrauen dafür zurückzugewinnen. Die Aufgabe, eine verantwortbare Lösung für die Endlagerung zu finden, verlangt jedoch von Politik, Gesellschaft, Wissenschaft und Industrie viel mehr Offenheit, Geduld und sehr viel mehr Geld als bisher und dazu die Bereitschaft Fehler zuzugeben und sich zu korrigieren. Das gilt für alle Länder, die die Atomenergie genutzt haben und das gilt ebenso für alle Atommächte.

Der vorliegende Bericht zeigt, dass es trotz internationaler Abkommen zum Umgang mit Atommüll kein einheitliches Vorgehen gibt. Bei der Klassifizierung des Atommülls und den Technologien zur Zwischenlagerung, bei der Finanzierung und auch bei den Auswahlverfahren für geeignete tiefegeologische Endlager unterscheiden sich die Länder erheblich. Auch die ernsthaften Anläufe der EU-Kommission, angesichts wachsender Probleme für einheitliche Standards und zumindest eine ausreichende Finanzierung der gesamten Entsorgung in den EU Staaten zu sorgen, sind bisher gescheitert.

Der vorliegende erste **WNWR** ist kein vollständiger Bericht zur globalen Lage der Entsorgung und Endlagerung von Atommüll. Dafür reichten die verfügbaren Gelder nicht. Neben vielen wichtigen Atomländern, die in den Länderkapiteln noch nicht berücksichtigt sind, sollte in einer weiteren Ausgabe auch auf die nationalen Such- und Auswahlverfahren sowie auf die jeweiligen Sicherheits- und Abwägungskriterien eingegangen werden. Die Engpässe der Zwischenlager, die im vorliegenden Bericht gezeigt werden, verlangen nach einer Betrachtung der langfristigen Sicherheit der verschiedenen nationalen technischen Konzepte, denn eine erschreckende Erkenntnis dieses Berichtes ist auch, dass sich über 80 Prozent der abgebrannten Brennelemente in europäischen Ländern in Nasslagern befinden. Ein weiteres wünschenswertes Kapitel sollte die Strategien des sofortigen Rückbaus und des sicheren Ein schlusses von Atomkraftwerken nach ihrer endgültigen Stilllegung und die jeweiligen Wirkungen für die Zwischenlagerung vergleichen. Auch wenn die tiefegeologische Endlagerung von Regierungen weltweit verfolgt wird, sind sich die Autoren dieses Berichtes einig, dass Forschung und Auseinandersetzung dazu noch lange nicht ausreichen. Die Diskussion über Alternativen oder Zwischenlösungen sollte also nicht vermieden sondern in weiteren Ausgaben des Berichtes bearbeitet werden. Alles in allem sehe ich zum Abschluss der Arbeiten an diesem ersten **WNWR** schon viel Stoff für die nächste Ausgabe oder eine Erweiterung in den nächsten Jahren.

Die Lösung der Probleme mit dem Atommüll werden wir kommenden Generationen überlassen. Ein wichtiges Anliegen des **WNWR** ist es deshalb, bisher vorhandenes Wissen weiterzugeben, international zugänglich und vergleichbar zu machen. Die gute Zusammenarbeit in einer internationalen Gruppe von alten und jungen Experten an diesem Bericht scheint mir auch ein Beitrag zum Generationenwechsel. Alle Autoren des Berichtes sind bereit, sich in Deutschland, in der Schweiz, in Belgien, Frankreich, Grossbritannien, der tschechischen Republik und anderswo in Debatten um laufende Suchverfahren einzubringen. Die Suche nach dem sichersten Weg und die Diskussion darum muss weitergehen. Aus der Atomkraft können wir aussteigen, aus den Problemen und ewigen Risiken des Atommülls nicht.

Mein Dank gilt allen Autoren und all denen, die uns mit Geld, Wissen und Arbeit unterstützt haben.

REBECCA HARMS

Im Wendland unweit von Gorleben im August 2020



DANKSAGUNG

DER WELT-ATOMMÜLL-BERICHT (The World Nuclear Waste Report / WNWR) ist ein gemeinsames Projekt einer Gruppe bekannter ExpertInnen. Der Bericht soll mehr Aufmerksamkeit für große und wachsende Probleme durch radioaktive Abfälle schaffen, für die eine langfristige Lösung noch fehlt. Der Bericht wurde von Rebecca Harms initiiert und von Wolfgang Neumann, Mycle Schneider und Gordon MacKerron konzipiert.

Das Kernteam des **WNWR** Projekts (Rebecca Harms, Mycle Schneider, Arne Jungjohann & Anna Turmann) hat seit 2018 daran gearbeitet, Partner, Geldgeber und Autoren zu gewinnen und den Bericht zu veröffentlichen. Rebecca Harms hatte die Gesamtleitung des Projektes, Arne Jungjohann koordinierte und bearbeitete die Beiträge. Anna Turmann trug in großem Umfang zur Koordination, Organisation, Redaktion und Haushaltsplanung bei. Mycle Schneider und Gordon MacKerron waren beständige und wertvolle Ratgeber bei der Gestaltung des Projektes.

Großer Dank für eine ausgezeichnete Arbeit gebührt auch den Autoren, einer großen internationalen Gruppe von ExpertInnen, von denen jeder ein oder mehrere Kapitel entwarf: Manon Besnard, Marcos Buser, Ian Fairlie, Gordon MacKerron, Allison MacFarlane, Eszter Matyas, Yves Marignac, Edvard Sequens, Johan Swahn und Ben Wealer. [Die Liste ihrer Bios](#) findet sich am Ende des Berichtes.

Die Qualität des **WNWR** gewann auch durch das teilweise oder umfassende Korrekturlesen, die Bearbeitung und Kommentierung durch Andrew Blowers, Rebecca Harms, Craig Morris, Mycle Schneider, Marcos Buser, Gordon MacKerron, Johan Swahn und Markku Lehtonen. Silvia Wekos Arbeit beim Korrekturlesen, der Bearbeitung und Prüfung von Abbildungen und Fußnoten und bei der Entwicklung eines stilistischen Leitfadens.

Dank gilt auch der in Berlin ansässigen Agentur für Erneuerbare Energien und hier insbesondere Andra Kradofer, die das Layout und Design entwickelte und auch die Grafiken und Tabellen einbaute.

Für die deutsche Fassung ist dem Übersetzer Heiko Jäger zu danken, Ben Wealer und Nina Schneider für das Korrekturlesen sowie Rebecca Harms für die Koordination.

Die Website des **WNWR** Projektes ist www.worldnuclearwastereport.org und wurde von Arne Jungjohann gemacht. Die Website bietet weitere Informationen und in Zukunft möglicherweise auch Updates.

Der **WNWR** enthält eine sehr große Menge an fachlichen Informationen und Zahlenangaben. Auch wenn die Beteiligten sich nach besten Möglichkeiten um Verifizierung und Prüfung bemühten: Niemand ist perfekt. Alle Projektbeteiligten freuen sich über Korrekturen oder Verbesserungsvorschläge (info@worldnuclearwastereport.org).

WIE SOLLTE DER WNWR ZITIERT WERDEN?

Der Welt-Atomwaste-Bericht. Fokus Europa. WNWR. 2019. Berlin & Brussels.
www.worldnuclearwastereport.org

INHALTSVERZEICHNIS

Partner & Förderer.....	2
Vorwort	3
Danksagung.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
Tabellen und Abbildungen	9
HAUPTERKENNTNISSE	10
EXECUTIVE SUMMARY	12
1. EINLEITUNG.....	19
2. ENTSTEHUNG UNDKLASSIFIZIERUNG	23
2.1 Abfallarten: die Kernbrennstoffkette	24
Uranabbau, Aufbereitung, Verarbeitung und Produktion von Kernbrennstoff.....	25
Kernspaltung (Brennstoffbestrahlung).....	26
Management von abgebrannten Brennelementen	26
Stilllegung von Reaktoren (und Anlagen der Kernbrennstoffkette)	26
2.2 Abfallmengen und Aktivität	27
2.3 Klassifizierungssysteme und Kategorien	27
2.3.1 Die IAEO-Klassifizierung	28
Exempt (EW).....	28
Abfall mit sehr geringer Halbwertszeit (VSLW)	28
Sehr schwachradioaktiver Abfall (VLLW)	29
Schwachradioaktiver Abfall (LLW)	29
Mittelradioaktiver Abfall (ILW)	29
Hochradioaktiver Abfall (HLW)	30
2.3.2 Die EU-Klassifizierung.....	30
2.3.3 Beispiele von nationalen Klassifizierungen.....	31
2.4 Zusammenfassung	34
3. ABFALLMENGEN	35
3.1 Berichtspflichten.....	35
3.2 Abfallmengen entlang der Versorgungskette	36
Uranabbau und Brennelementeherstellung	36
Betriebsabfälle	36
Abgebrannte Brennelemente	38
Abfälle aus der Stilllegung	38
Geschätzte Abfallmengen entlang der Lieferkette.....	40
3.3 Gemäß des gemeinsamen Übereinkommen berichtete Abfallmengen	41
Uranabbau und Brennstoffherstellung.....	41
Schwach- und mittelradioaktive Abfälle.....	42
3.4 Zusammenfassung	49
4. RISIKEN FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT	51
4.1 Strahlenrisiken durch Atommüll.....	51
4.2 Risiken des Uranabbaus Aufbereitung, Anreicherung und Brennstoffherstellung.....	53
Gesundheitsrisiken durch Strahlenbelastung durch Uran.....	53

Uranabbau	55
Uranabraumhalden	55
Aufbereitung, Anreicherung und Brennstoffherstellung	57
4.3 Risiken aus dem Betrieb von Anlagen	57
Risiken im Zusammenhang mit gasförmigen, flüssigen und festen Abfällen	57
Risiken für Beschäftigte in Nuklearanlagen	59
4.4 Risiken durch abgebrannte Brennelemente	59
Risiken im Zusammenhang mit Abgebrannten Brennelementen in Abklingbecken	60
4.5 Risiken im Zusammenhang mit der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen	61
Spaltmaterialien	63
Mischoxid-Brennstoff (MOX)	63
4.6 Risiken im Zusammenhang mit Stilllegung	63
Fortgesetzte Freisetzungen von Radionukliden aus abgeschalteten Reaktoren	64
Strahlenbelastung durch Stilllegung versus Betrieb	64
4.7 Zusammenfassung	65
5. MANAGEMENT-KONZEPTE FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE	66
5.1 Historischer Hintergrund	66
5.2 Der Kontext des Managements von radioaktiven Abfällen	72
Endlagerkonzepte	74
Wirtsgesteine	75
LILW-Endlager	76
HLW-Endlager	78
Endlagerung in tiefen Bohrlöchern	80
5.4 Interim-Strategien: Lagerung	81
Zwischenlagerung	81
Nasslagerung	81
Trockenlagerung	81
Langzeit-Zwischenlagerung	83
Wesentliche Herausforderungen bei der Langzeit-Zwischenlagerung	84
5.5 Zusammenfassung	85
6. KOSTEN UND FINANZIERUNG	87
6.1 Die Art der Finanzierungssysteme für Stilllegung, Zwischenlagerung und Endlagerung	87
Grundsätzliche Haftung für Stilllegung und Management radioaktiver Abfälle	87
Überblick und Art der Finanzierung	88
Akkumulation der finanziellen Mittel	89
6.2 Kostenschätzungen und Erfahrungen	91
Methodik der Kostenschätzung	91
Stilllegungskosten	92
Endlagerungskosten	94
6.3 Finanzierungssysteme	95
Finanzierungssysteme für die Stilllegung	95
Finanzierungssysteme für Zwischenlagerung	97
Finanzierungssysteme für Endlagerung	98
Integrierte Finanzierungssysteme	100
6.4 Zusammenfassung	102

7. LÄNDERSTUDIEN.....	104
7.1 Tschechische Republik.....	104
Überblick	104
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	105
Abfallmengen.....	105
Abfallpolitik und Anlagen	107
Kosten und Finanzierung	108
Zusammenfassung	109
7.2 Frankreich	110
Überblick	110
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	111
Sonstige radioaktive Materialien, die nicht als Abfälle klassifiziert sind.....	111
Abfallmengen.....	112
Abfallpolitik und Anlagen	115
Kosten und Finanzierung.....	117
Zusammenfassung	119
7.3 Deutschland.....	120
Überblick	120
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	121
Abfallmengen.....	121
Abfallpolitik und Anlagen	124
Kosten und Finanzierung	125
Zusammenfassung	127
7.4 Ungarn.....	128
Überblick	128
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	128
Abfallmengen.....	129
Abfallpolitik und Anlagen	130
Kosten und Finanzierung.....	132
Zusammenfassung	133
7.5 Schweden	134
Überblick	134
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	135
Abfallmengen.....	136
Abfallpolitik und Anlagen	137
Kosten und Finanzierung.....	139
Zusammenfassung	141
7.6 Schweiz	142
Überblick	142
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	143
Abfallmengen.....	143
Abfallpolitik und Anlagen	145
Kosten und Finanzierung.....	146
Zusammenfassung	147
7.7 Großbritannien.....	148
Überblick	148
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	149
Abfallmengen.....	150
Abfallpolitik und Anlagen	152

Kosten und Finanzierung.....	154
Zusammenfassung	155
7.8 Vereinigte Staaten von Amerika.....	156
Überblick	156
Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle.....	157
Abfallmengen.....	158
Abfallpolitik und Anlagen	159
Kosten und Finanzierung.....	162
Zusammenfassung	163
8. LISTE DER ABKÜRZUNGEN	164
9. MITWIRKENDE.....	169
Impressum	171

TABELLEN UND ABBILDUNGEN

TABELLE

1	Vollständig stillgelegte Reaktoren weltweit	39
2	Schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Europe in Zwischenlagern und Endlagern	43
3	Berichtete Bestände an abgebrannten Brennelementen und Abfallmenge in Nasslagern in Europa	47
4	Gelagerte hoch- und mittelradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung.....	49
5	Länderprogramme für tiefegeologische Endlager für hochradioaktiven Abfall.....	79
6	Finanzierungssysteme für Stilllegung in Deutschland, Frankreich und der Tschechischen Republik..	97
7	Finanzierungssysteme für Endlagerung in Deutschland, Frankreich und in den USA.....	100
8	Integrierte Finanzierungssysteme für Stilllegung und Management radioaktiver Abfälle in Großbritannien, Schweden und in der Schweiz	101
9	Atom Müll in der Tschechischen Republik	106
10	Kategorien und Managementstatus von radioaktiven Abfällen in Frankreich.....	111
11	Radioaktive Abfälle in Frankreich.....	113
12	Schätzungen der Bruttokosten für das Management von radioaktiven Abfällen in Frankreich	117
13	Rückstellungen für Stilllegung und Management von radioaktiven Abfällen in Frankreich.....	118
14	Radioaktive Abfälle in Deutschland	123
15	Radioaktive Abfälle in Ungarn	130
16	Kategorien von radioaktiven Abfällen in Schweden	135
17	Radioaktive Abfälle in Schweden	136
18	Radioaktive Abfälle in der Schweiz	144
19	Radioaktive Abfälle in Großbritannien	151
20	Radioaktive Abfälle in den USA	159

ABBILDUNG

1	Die Kernbrennstoffkette.....	25
2	Geschätzte Mengen an radioaktiven Abfällen aus dem Betrieb und der Stilllegung der europäischen Reaktoren, und aus dem Management von abgebrannten Brennelementen in m ³	41
3	Abgebrannte Brennelemente in Zwischenlagern in Europa in Tonnen.....	45



HAUPTERKENNTNISSE



ZU KONZEPTEN FÜR DAS MANAGEMENT RADIOAKTIVER ABFÄLLE

- **Weltweit hat kein Land ein Endlager für abgebrannte Brennelemente in Betrieb genommen.** Finnland ist zur Zeit das einzige Land, in dem ein Endlager für hochradioaktiven Abfall in Bau ist.
- **Obwohl mehrere Auswahlverfahren scheiterten und Endlagerstandorte aufgegeben wurden, wird die tiefengeologische Endlagerung als bevorzugte Option weiterverfolgt.** Der bisherige Stand der Forschung und der Austausch mit der Zivilgesellschaft werden der Herausforderung der Aufgabe nicht gerecht.
- Weil tiefengeologische Endlager noch für viele Jahrzehnte nicht verfügbar sein werden, **verlängern sich die Zeiträume für die Nutzung der Zwischenlager, die zudem in vielen Fällen ihre Kapazitätsgrenze erreichen.** Zum Beispiel hat die Auslastung in Finnland 93 Prozent erreicht.



ZU DEN MENGEN VON ATOMMÜLL

- **Über 60.000 Tonnen abgebrannten Kernbrennstoffs wird in Europa zwischengelagert** (ausgenommen Russland und Slowakei), das meiste davon in Frankreich. Verbrauchter Kernbrennstoff macht trotz geringeren Volumens den größten Teil der Radioaktivität des vorhandenen Atommülls aus. Im Jahr 2016 lagerten 81 Prozent des verbrauchten Kernbrennstoffs in Europa in Nasslagern. Nasslager sind im Vergleich zu Trocken-/Behälterlagern mit besonderen Risiken verbunden.
- **Etwa 2,5 Millionen Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle sind bisher in Europa angefallen.** Um die 20 Prozent davon (0,5 Millionen Kubikmeter) sind in Zwischenlagern, 80 Prozent wurden bereits endgelagert.
- Durch Stilllegung und Rückbau europäischer Reaktoren ist **eine zusätzliche Menge von mindestens 1,4 Millionen Kubikmetern schwach- und mittelaktiver Abfälle zu erwarten.**
- **Mit dem Betrieb europäischer Atomkraftwerke werden voraussichtlich 6,6 Millionen Kubikmeter radioaktiver Abfälle verursacht.** Stapelte man diesen Atommüll auf einem Platz, würde ein Turm entstehen, der ein Fußballfeld füllt und 919 Meter hoch ist, 90 Meter höher als das höchste Gebäude der Welt, das Burj Khalifa in Dubai. Vier europäische Länder sind verantwortlich für über 75 Prozent dieses Mülls: Frankreich (30 Prozent), Vereinigtes Königreich (20 Prozent), Ukraine (18 Prozent) und Deutschland (8 Prozent).
- Neben Russland, das nach wie vor Uran abbaut, haben **in Europa Deutschland und Frankreich den größten Bestand des Atommülls aus dem Uranabbau.**



HAUPTERKENNTNISSE



KOSTEN UND FINANZIELLE VORSORGE

- **Die Regierungen wenden das Verursacherprinzip für Atommüll nicht konsequent an.** Obwohl die Betreiber der Atomkraftwerke für die Kosten des gesamten Managements und der Zwischen- und Endlagerung verantwortlich sind, wird wohl ein großer Teil der Kosten letztlich vom Staat getragen werden müssen.
- **Regierungen versagen bei der Kostenabschätzung für Rückbau, Konditionierung und Zwischen- und Endlagerung.** Ihre Annahmen gründen zumeist auf optimistischen Angaben der Betreiber und überholten Daten, was wiederum zu sehr ernstzunehmenden Finanzierungslücken für das gesamte Management radioaktiver Abfälle führt.
- **Insgesamt ist festzustellen, dass kein Land die Kosten richtig schätzt und die Lücke zwischen finanziellen Rückstellungen und geschätzten Kosten schließt.**



HERKUNFT UND KLASSIFIZIERUNG

- **Die Definition und Kategorisierung von Atommüll und die Berichte über die Menge produzierter radioaktiver Abfälle unterscheiden sich erheblich unter den Ländern.** Alle Länder veröffentlichen regelmäßig Informationen, aber nicht alle berichten gründlich.
- Trotz internationaler Bemühungen um gemeinsame Standards für die Sicherheit und Praxis, gibt es **weiter erhebliche Unterschiede und Vergleiche sind wegen fehlender Konsistenz schwierig.** Die Unterschiede der nationalen Vorgehensweise zeigen den Mangel an Kohärenz beim Management radioaktiver Abfälle.



RISIKEN FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT

- **Radioaktive Abfälle gefährden die Gesundheit** aufgrund gasförmiger und flüssiger Emissionen aus dem Normalbetrieb von Atomanlagen und wegen der globalen Kollektivdosis, die durch Wiederaufarbeitung entsteht.
- **Die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen schafft besondere Herausforderungen,** vor allem die Risiken durch Proliferation, durch hohe Strahlenexposition für Menschen und die Kontamination der Umwelt.
- **Insgesamt besteht ein Mangel an umfassenden, quantitativen und qualitativen Informationen zu Risiken, die durch Atommüll verursacht werden.**



EXECUTIVE SUMMARY

DER WELT-ATOMMÜLL-BERICHT (The World Nuclear Waste Report / WNWR) zeigt, dass Regierungen weltweit seit Jahrzehnten damit ringen, umfassende Strategien zum Management von Atommüll zu entwickeln und umzusetzen. Ein großer Teil der Aufgabe wird zukünftigen Generationen überlassen werden.



MANAGEMENT-KONZEPTE FÜR ATOMMÜLL

Mehr als 70 Jahre nach Beginn des Atomzeitalters hat kein Land, das Atomkraftwerke nutzt, ein tiefes geologisches Endlager für hochradioaktiven abgebrannten Brennstoff in Betrieb. Finnland ist das einzige Land, in dem ein solches Endlager für den gefährlichsten Teil des Atommülls in Bau ist. Außer Finnland haben nur Schweden und

Frankreich de facto den Ort für ein tiefes geologisches Endlager bestimmt. In den USA wird das Waste Isolation Pilot Project (WIPP) betrieben, allerdings nur für langlebige Abfälle aus dem Atomwaffenprogramm und nicht für abgebrannten Kernbrennstoff aus kommerziellen Reaktoren.

Trotz mehrerer Beispiele gescheiterter Standortauswahlverfahren und aufgebener Standorte wird national und international die tiefengeologische Endlagerung weiter als bevorzugte Variante als Ziel verfolgt. Dies erfordert klare und ehrgeizige Bedingungen für die Standortauswahl-, die Erkundungs-, Bewertungs- und Genehmigungsprozesse. Bisher gibt es keine Garantie für die Machbarkeit der tiefengeologischen Endlagerung. Auch deshalb muss der gesamte Prozess der Suche, Abwägung und Entscheidung mit außerordentlicher Sorgfalt gestaltet werden. Einige Wissenschaftler treten für eine schneller zu verwirklichende überwachte Langzeitlagerung in einer geschützten Umgebung ein, unter der Erde aber oberflächennah. Es gibt einen starken Konsens, dass es bisher keinen ausreichenden Austausch zwischen Wissenschaft, Politik und Bürgern über aktuelle Endlagerforschung und -vorbereitung in der Qualität gibt, der der Dimension der Herausforderung gerecht wird.

Konditionierung, Transport und die Zwischen- und Endlagerung von Atommüll stellen eine bedeutende und wachsende Herausforderung für alle Atomstaaten dar. **Regierungen und zuständigen Behörden sind unter Druck wegen der Sicherheitsmängel ihrer Konzepte und Programme zur Zwischen- und Endlagerung.** Für die Programme zum Management von Atommüll müssen ehrgeizige Standards verankert werden, die eine hohe Qualität der Planung, der Sicherheitsziele, der Sicherheitskultur, der Transparenz, der Partizipation und der Entscheidungsfindung gewährleisten.

Die Zwischenlagerung von verbrauchtem Kernbrennstoff und hochradioaktiven Abfällen wird noch ein Jahrhundert oder länger andauern. Tiefengeologische Endlager werden noch für Jahrzehnte nicht verfügbar sein, sodass **sich die Risiken der Lagerung länger als geplant auf Zwischenlager verschieben.** Die heutige Zwischenlagerung von hochradioaktiven abgebrannten Brennelementen und anderen hoch- und mittlerradioaktiven Abfällen ist nicht für so lange Zeiträume geplant worden. Die heutige Praxis bringt höhere und zunehmende Risiken insbesondere, wenn die Zwischenlagerung abgebrannten Kernbrennstoffs über lange Zeit in Nasslagern geschieht.



MENGENENTWICKLUNG

In **Europäischen Ländern** sind mehrere Millionen Kubikmeter Atommüll angefallen (Abbau- und Prozessabfälle der Urangeinnung nicht eingerechnet). Ende 2016 waren **Frankreich, das Vereinigte Königreich und Deutschland die größten Verursacher von Atommüll** entlang der Brennstoffkette.

Über 60.000 Tonnen verbrauchten Kernbrennstoffs werden europaweit gelagert (ausgenommen Russland und Slowakei), das meiste davon in Frankreich. Innerhalb der EU entfallen 25 Prozent auf Frankreich, 15 Prozent auf Deutschland und 14 Prozent auf das Vereinigte Königreich. Verbrauchter Kernbrennstoff wird als hochradioaktiver Abfall bewertet. Obwohl dieser Müll vergleichsweise in kleineren Mengen anfällt, enthält er den größten Teil der Radioaktivität. Im Vereinigten Königreich zum Beispiel machte der hochradioaktive Abfall nur 3 Prozent des Volumens des gesamten Atommülls aus, aber eben fast 97 Prozent des radioaktiven Inventars. Der größte Teil der abgebrannten Brennelemente lagert in Abkühlbecken, um Hitze und Radioaktivität zu reduzieren. Ende 2016 befanden sich 81 Prozent der in Europa verbrauchten Brennelemente in Nasslagern. Es gilt als weit weniger riskant den verbrauchten Kernbrennstoff in Behälter umzuladen und in Trocken-/Behälterlagern zwischenzulagern. Für einen großen Anteil der zwischengelagerten abgebrannten Brennelemente in Frankreich und den Niederlanden ist die Wiederaufarbeitung geplant. Die meisten europäischen Atomstaaten (Belgien, Bulgarien, Deutschland, Ungarn, Schweden, Schweiz und zuletzt das Vereinigte Königreich) haben die Wiederaufarbeitung endgültig aufgegeben oder zumindest auf unabsehbare Zeit verschoben. Nicht alle Länder berichten über die Mengen verbrauchten Kernbrennstoffs, die wiederaufgearbeitet worden sind. In den meisten Fällen wird nur über den verglasten hochradioaktiven Müll berichtet, der aus der Aufarbeitung stammt.

Rund 2,5 Millionen Kubikmeter schwach- und mittelradioaktiver Abfälle sind in Europa produziert worden (ausgenommen Russland und Slowakei). Ungefähr 20 Prozent davon (0,5 Millionen Kubikmeter) befinden sich in Europa in Zwischenlagern und warten auf die Endlagerung. Die Menge wächst weiter, ohne dass irgendwo Klarheit über die Endlagerung besteht. Rund 80 Prozent dieser Kategorie des Atommülls wurde endgelagert. Das bedeutet jedoch nicht, dass dieser Müll für die nächsten Jahrhunderte sicher lagert. Asse II, das erste atomare Endlager in der Bundesrepublik in einem ehemaligen Salzbergwerk, ist durch dauernden Wassereintritt zu einer Gefahr geworden. 220.000 Kubikmeter einer Mischung aus Atommüll und Salz müssen und sollen geborgen werden. Es handelt sich um eine schwierige, riskante und sehr teure Aufgabe. Die Menge der Mischung aus Atommüll und Salz, die geborgen werden muss, ist fünf Mal größer als die in den siebziger Jahren eingelagerte. Der Begriff „endgelagert“ ist in Bezug auf bestehende Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit Vorsicht zu verwenden. Beim Rückbau von Atomanlagen werden zusätzlich zu den Abfällen aus Versorgung, Wartung und Betrieb der AKW weitere große Mengen Atommüll anfallen. Ohne die Anlagen entlang der Brennstoffkette werden **allein beim Rückbau der Europäischen Atomkraftwerke mindestens 1,4 Millionen Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle entstehen**. Dies Schätzung ist konservativ, Erfahrungen mit dem Rückbau von Reaktoren sind erst gering. Stand 2018 waren in Europa 142 Atomkraftwerke in Betrieb (ausgenommen Russland und Slowakei).

Die laufend durch den Betrieb von Atomkraftwerken und zusätzlich beim Rückbau anfallenden Atomabfälle stellen ein wachsendes Risiko dar, denn **Zwischenlager kommen langsam an die Grenzen ihre Kapazitäten. Das gilt insbesondere für den hochradioaktiven verbrauchten Kernbrennstoff**. In Finnland sind diese Zwischenlagerkapazitäten zu 93 Prozent, in Schweden ist die Kapazität des Lagers CLAB zu 80 Prozent ausgeschöpft. Da nicht alle Länder über die Auslastung dieser Zwischenlager berichten, ist ein vollständiger Überblick nicht möglich.

Über ihre Lebensdauer wird die Europäische Reaktorflotte rund 6,6 Millionen Kubikmeter Atommüll verursachen (ohne Russland und Slowakei). Stapelte man diesen Atommüll auf einem Platz, würde ein Turm entstehen, der ein Fußballfeld füllt und 919 Meter hoch ist, 90 Meter höher als das höchste Gebäude der Welt, das Burj Khalifa in Dubai. Diese Kalkulation umfasst Atommüll aus dem Betrieb der Atomkraftwerke, den verbrauchten Brennelementen und Abfälle aus dem Rückbau. Die Schätzungen

basieren auf konservativen Annahmen. Die tatsächlichen Abfallmengen in Europa sind wahrscheinlich größer. Vier europäische Länder sind verantwortlich für über 75 Prozent dieses Mülls: **Frankreich hat einen Anteil von 30 Prozent des Europäischen Atommülls, das Vereinigte Königreich von 20, Ukraine von 18 und Deutschland von 8.**

Neben Russland, das auch weiter ein aktiver Produzent von Uran ist, **haben in Europa Frankreich und Deutschland das größte Inventar an Atommüll aus dem Uranabbau.** Offiziell hat die inzwischen eingestellte französische Uranindustrie 50 Millionen Tonnen Abfall aus dem Bergbau. Unabhängige Experten gehen von einer größeren Menge aus. In der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) wurde sehr viel mehr Uran abgebaut als in Frankreich. Die Hinterlassenschaft des Uranbergbaus der DDR umfasst 32 km² an ehemaligen Betriebsflächen, 48 Halden mit einem Volumen von 311 Millionen m³ schwach-radioaktiven Mülls und 4 Teiche mit insgesamt 160 Millionen m³ radioaktiver Schlämme. Heute wird das Uran zum allergrößten Teil nach Europa importiert, die Atomabfälle aus der Gewinnung fallen so größtenteils außerhalb Europas an.



KOSTEN UND FINANZIERUNG

So gut wie jede Regierung behauptet, das Verursacherprinzip anzuwenden, das die Betreiber von Atomanlagen verantwortlich macht für die Kosten der Behandlung, Zwischen- und Endlagerung der atomaren Abfälle. **Tatsächlich scheitern Regierungen in der Regel bei der Anwendung des Verursacherprinzips.** Die meisten Länder wenden es nur auf den Rückbau an. In einigen Fällen treten Regierungen auch für die Kosten des Rückbaus ein (zum Beispiel im Falle der Reaktoren in der ehemaligen DDR). Bulgarien, Litauen und die Slowakische Republik erhalten finanzielle Unterstützung der EU, weil sie sich mit dem Beitritt zur EU zur Stilllegung ihrer RBMK Reaktoren (Tschernobyl-Design) verpflichtet hatten. Die meisten Länder wenden das Verursacherprinzip nicht auf die Kosten der Endlagerung von Atommüll an. Deshalb werden die Kosten für die langfristige Zwischenlagerung und Endlagerung letztlich zumindest teilweise von Behörden und Staat übernommen. Der Betreiber von Atomanlagen ist aber verpflichtet, zu den langfristigen Kosten beizutragen. Selbst in den Ländern, in denen das Verursacherprinzip Rechtsgrundlage ist, wird es nur unvollständig angewendet. Sollte zum Beispiel ein Problem auftreten, nachdem ein Endlager einmal abgeschlossen sein wird, werden die Verursacher des Mülls nicht mehr zur finanziellen Verantwortung herangezogen. Das ist heute zum Beispiel der Fall in Deutschland am Endlager Asse, wo die Bergung einer großen Menge von dort in den 1970er Jahren endgelagerten Abfällen nun vom Staat bezahlt wird.

Regierungen scheitern dabei, die Kosten für Rückbau, Zwischen- und Endlagerung der Atomabfälle zuverlässig einzuschätzen. Alle Schätzungen müssen mit Unwägbarkeiten umgehen wegen sehr langer zu betrachtender Zeiträume und wegen Kostensteigerungen und Akkumulation der Fonds. Ein wichtiger Grund für die Mängel der Schätzungen ist die fehlende Erfahrung mit Rückbau und Lagerung. Nur drei Länder, nämlich die Vereinigten Staaten, Deutschland und Japan haben Stilllegungen und Rückbauten komplett abgeschlossen und dazu auch verfügbare Daten gewonnen. Bis Mitte 2019 wurden von den weltweit stillgelegten 181 Reaktoren nur 19 zurückgebaut und nur bei 10 davon ist das Ziel „grüne Wiese“ erreicht worden. Aber schon diese begrenzten Erfahrungen zeigen ein breites Spektrum von Unsicherheit, bis zu einem Faktor 5. In den Vereinigten Staaten reichten die Unterschiede für Rückbaukosten von US\$ 280/kW bis zu US\$ 1.500/kW (ca. €₂₀₁₆ 247/kW bis €₂₀₁₆ 1.325/kW). In Deutschland wurde ein Reaktor für € 9.300/kW und ein anderer für € 1.700/kW zurückgebaut.

Viele Regierungen gründen ihre Kostenschätzung auf überholten Daten. Viele der betrachteten Länder prüften ihre Kostenschätzung, aber sie verwendeten Daten aus den 1970er und 80er Jahren, anstatt die

wenigen aber verfügbaren Daten zu nutzen, die bei realen Rückbau-Projekten erhoben wurden. Überholte Daten zu nutzen, die zumeist von der Atomwirtschaft, den Betreibern oder staatlichen Behörden stammen, führt eher zur Unterschätzung der Kosten und überoptimistischen Schlussfolgerungen.

Viele Regierungen rechnen mit einer überoptimistischen Akkumulation der Fonds. Ein wichtiger Faktor, der zur Unterschätzung der Kosten für Rückbau und Entsorgung führt, ist die Zuversicht für Kapitalgewinne der Fonds. Ein fundamentaler Irrtum bei den Entscheidungen über die Höhe der Rückstellungen für die Entsorgung sind zuversichtliche Erwartungen, die darauf bauen, dass die Fonds mit der Zeit wachsen. In Deutschland zum Beispiel sind im Entsorgungsfond € 24 Milliarden zurückgestellt für die gesamte Entsorgung und es wird damit gerechnet, dass der Fond um fast das 4 Fache auf € 86 Milliarden wächst. Die erwarteten oder angesetzten Zuwachsraten gehen weit auseinander. Nicht alle Länder bei ihren Abschätzungen für die finanzielle Vorsorge und die notwendigen Rückstellungen Kostensteigerungen berücksichtigt, obwohl die Kosten wahrscheinlich schneller steigen als die allgemeine Inflationsrate. Um die Verfügbarkeit ausreichender Mittel für Rückbau und Entsorgung inklusive Endlagerung zu garantieren, müssten die Rückstellungen zweckgebunden festgelegt sein. Es muss sichergestellt sein, dass die zurückgestellten Mittel ausreichend sind, um die tatsächlichen Kosten zu decken. Einige Länder erfüllen die eine Anforderung aber versagen bei der anderen.

Die Staaten unterscheiden sich signifikant in den Regeln zur Finanzierung für das Management von Atommüll und für Zwischen- und Endlagerung. Nicht alle Atomstaaten verlangen, dass die Entsorgungsfonds getrennt vom Betreiber verwaltet werden. In einigen Fällen wird der Rückbau immer noch durch abgegrenzte Fonds innerhalb der Unternehmen finanziert, obwohl die Mittel für das langfristige Management der Atomabfälle in den meisten Ländern über externe Fonds geregelt ist. Die Finanzierung von Rückbau und Lagerung ist eine komplexe langfristige Aufgabe; in den meisten Fällen haben die Staaten mehrere Finanzierungssysteme etabliert.

Zu den unterschiedlichen nationalen Ansätzen kommt hinzu, dass nicht alle Staaten definiert haben, was der Rückbau umfasst. Die Behandlung und Lagerung aller radioaktiven Abfälle, die sichere Lagerung auch des verbrauchten Brennstoffs, ist ein wichtiger Teil des Rückbaus. Beides wird bei der Definition von Rückbau nicht in allen Staaten berücksichtigt. Das macht es schwieriger die Kosten in den Staaten zu vergleichen. **Die Prozesse des Rückbaus, der Zwischen- und Endlagerung sind verbunden. Neben der Verfügbarkeit der Mittel in der Zukunft ist das ein wichtiger Grund für externe Fonds mit verbindlich geregelter Verwendungszweck.** Nur wenige Länder haben sich für diesen Weg entschieden. Zu nennen sind Schweden, das Vereinigte Königreich und die Schweiz. Die Schweiz hat aber auch zwei Fonds, einen für den Rückbau und einen für das Management der radioaktiven Abfälle. **Kein Land hat bisher die Finanzierung für Rückbau und Entsorgung sicher gewährleistet.** Diese Finanzierung hinzubekommen, bleibt eine große oft verdrängte Herausforderung für alle Staaten, die die Atomkraft nutzen.

Bis heute hat kein Land die Kosten präzise kalkuliert und die Lücke zwischen Rückstellungen und erwarteten Kosten geschlossen. In den meisten Fällen ist nur ein Teil der benötigten Mittel zurückgestellt worden. Schweden zum Beispiel hat zwei Drittel der für Rückbau und Entsorgung geschätzten Kosten im Fond, das Vereinigte Königreich hat weniger als die Hälfte für die bisher arbeitenden Reaktoren und die Schweiz hat noch nicht einmal ein Drittel. Gleiches kann für die Vorsorge für die Endlagerung festgestellt werden. Frankreich und die USA für Endlagerung nur rund ein Drittel der geschätzten Kosten zurückgestellt. Da die Zahl der vorzeitigen Stilllegungen von Reaktoren auch wegen ungünstiger wirtschaftlicher Bedingungen wächst, nehmen auch die Risiken durch unzureichende Finanzierung zu. Vorzeitige Stilllegung, unzureichende Rückstellungen und steigende Kosten führen auch dazu, dass ei-

nige Betreiber von Atomanlagen andere Stilllegungen und den Rückbau verzögern, auch um mit dem Weiterbetrieb zusätzlich Mittel für die Rückstellung zu erwirtschaften. Einige Staaten, zum Beispiel die Vereinigten Staaten und Japan, erwägen, Betreibern der Atomkraftwerke durch höhere Abgaben, subventionierte Preise oder Laufzeitverlängerung zu ermöglichen, die Finanzierungslücken zu schließen.



HERKUNFT UND KLASSIFIZIERUNG

Die Länder unterscheiden sich signifikant bei ihrer jeweiligen Definition von Atommüll. Ob abgebrannter Kernbrennstoff und die abgetrennte Stoffe aus der Wiederaufarbeitung (Plutonium und wiederaufgearbeitetes Uran) als Müll oder als Rohstoff gilt, ist in den Ländern verschieden. Abgebrannter Kernbrennstoff und das Plutonium, das er enthält, gilt in den meisten Ländern als Atommüll wegen der gefährlichen Eigenschaften und wegen der hohen Kosten der Abtrennung und der Verwendung von Plutonium. Frankreich allerdings schreibt die Wiederaufarbeitung des verbrauchten Kernbrennstoffs gesetzlich vor und betrachtet auch das abgetrennte Plutonium als Rohstoff. Die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente schiebt die die Atommüllfrage auf und macht eine Lösung noch schwieriger und teurer.

Die Länder unterscheiden sich signifikant bei der Kategorisierung der radioaktiven Abfälle. Es finden sich keine zwei Länder, die identische Systeme haben. Deutschland differenziert nur zwischen wärmeentwickelnden und anderen radioaktiven Abfällen. Im Vereinigten Königreich basiert die Klassifizierung auf dem Level der Radioaktivität. Frankreich und die Tschechische Republik berücksichtigen das Level der Radioaktivität und die Halbwertszeit. Das US System unterscheidet sich fundamental von den europäischen und macht die Herkunft des Atommülls und nicht seine Eigenschaften zur Grundlage der Klassifizierung.

Die Staaten unterscheiden sich signifikant in ihren Berichten über die anfallenden Mengen von Atommüll. Alle Staaten veröffentlichen regelmäßig Informationen über die Mengen des Mülls, der produziert wird und damit verbundene Entsorgungsmaßnahmen. Nicht alle Länder berichten mit angemessener Sorgfalt. In einigen Fällen (zum Beispiel in der Slowakischen Republik) ermöglicht der Bericht nicht, das Volumen abzuschätzen. In einigen Berichten (zum Beispiel aus Niederlanden und Belgien) fehlt das aktuelle Inventar des verbrauchten Kernbrennstoffs. Russland gibt spärliche Informationen über die Klassifizierung und über den Zustand auch seines Inventars an radioaktiven Abfällen.

Diese Unterschiede und die Inkonsistenzen bei den Definitionen, der Kategorisierung und den Berichtspflichten zu Atommüll machen das sammeln und vergleichen von Daten sehr kompliziert. Die verschiedenen nationalen Ansätze zeigen einen Mangel an Kohärenz beim Umgang mit Atommüll. Die Unterschiede treten auf, trotz der internationalen Versuche, gemeinsame Sicherheitsprinzipien zu verankern und einen Peer Review Prozess für die Praxis in den Ländern zu schaffen. Die Internationale Atomenergie Organisation (IAEO) bietet einen breiten Rahmen für die Klassifizierung von Atommüll an. Das Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit radioaktiver Abfälle von 2001 setzt Standards für Atommüllstrategien in vielen Ländern, allerdings mit großen Unterschieden in der Umsetzung. Mit der EURATOM Richtlinie von 2011 versuchte die Europäische Union, die Klassifizierungssysteme in den Mitgliedstaaten zu harmonisieren, aber mit geringem Erfolg.



RISIKEN FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT

Radioaktive Abfälle gefährden die Gesundheit aus mehreren Gründen. Erstens wurden Gesundheitsfolgen durch die routinemäßige Freisetzung und Ableitung flüssiger und gasförmiger radioaktiver Abfälle aus Atomanlagen berichtet. Zweitens ist die besonders hohe globale Kollektivdosis aus der Wiederaufarbeitung zu nennen. Und drittens stellt der unbefriedigende und instabile Zustand eines großen Teils des vorhandenen Atommülls eine Gefährdung dar.

Hochradioaktive Abfälle in Form von abgebrannten Brennelementen und verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung enthalten mehr als 90 Prozent der Radioaktivität des gesamten Atommülls. Trotzdem gibt es weltweit kein voll betriebsbereites Endlager für hochradioaktive Abfälle. Die andauernde Praxis, abgebrannte Brennelemente in Wasserbecken an den Atomkraftwerken zu lagern, bedeutet ein erhebliches Risiko für die Bevölkerung und die Umwelt. **Durch die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen werden hochgefährliche radioaktive Abfälle geschaffen, die einfacher zugänglich und in ausbreitbarer Form vorliegen, damit verbunden sind auch besondere Herausforderungen** durch Proliferationsrisiken, durch hohe Strahlenbelastung für Beschäftigte und die Bevölkerung sowie die Umwelt.

Informationen zur angemessenen Risikobewertung und zur Erstellung eines Rankings der Gefahren durch radioaktive Abfälle sind begrenzt. Nur wenige Länder veröffentlichen Informationen zum Beispiel über das Nuklidinventar der Abfälle. Regierungen oder staatliche Agenturen sind in erster Linie für die Erfassung und Verbreitung solcher Daten verantwortlich. Diese Daten werden gebraucht, um den möglichen kausalen Zusammenhang von Strahlenbelastung und Gesundheitsfolgen zu bewerten. Bisher gibt es kein umfassendes Gefahrenschema für Radionuklide in radioaktiven Abfällen.

Es mangelt an umfassenden, anspruchsvollen Studien zur Bewertung der Risiken durch Atommüll. Risiken können aus epidemiologischen Studien abgeleitet werden, jedoch sind die wenigen vorhandenen nicht von ausreichender Qualität. Einige Studien legen zum Beispiel erhöhte Krebsraten nahe, aber sind zu klein angelegt, um statistisch signifikante Ergebnisse zu erbringen. Meta-Analysen könnten mehrere Studien zusammenführen und größere Datensätze generieren, die dann statistisch signifikante Erkenntnisse ergeben könnten. Es ist bemerkenswert, dass es Meta-Analysen zu Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Atommüll so gut wie gar nicht gibt. Um Risiken zu bewerten, wäre es zusätzlich notwendig, Dosen akkurat zu messen. Insgesamt ist festzustellen, dass es einen erstaunlichen Mangel an quantitativen und qualitativen Informationen zu den Risiken gibt, die mit Atommüll verbunden sind.

ZUR ARBEITSMETHODE UND DEN PERSPEKTIVEN FÜR DEN BERICHT

Der Welt-Atommüll-Bericht 2019 – Fokus Europa (WNWR 2019) liefert einen internationalen Vergleich der unterschiedlichen Strategien zum Management von Atommüll in Staaten, die Atomkraft nutzen, beschreibt den derzeitigen Status und historische Trends. Mit dem Fokus auf Europa ist der Bericht ein Anfang, um eine Forschungslücke zu schließen. Außerhalb Europas ist die Praxis von Regierungen und Atomkraftwerksbetreibern im Umgang mit den Herausforderungen durch Atommüll noch vielfältiger. Auf dem Weg zu einer verantwortbaren Lösung für den Atommüll liegen große soziale, politische, technische, wissenschaftliche und finanzielle Herausforderungen.

Dieser Bericht ist der erste seiner Art und einige Hürden mussten genommen werden, um basierend auf vielen sachlichen und numerischen Daten einen Überblick zu erstellen. Die Länder unterscheiden sich nicht nur bei der Definition von Atommüll, seiner Klassifizierung und den nationalen Berichten zu den

Mengen. Bei der Arbeit wurde auch sichtbar, dass es an Daten mangelt, hatte mit Sprachbarrieren zu kämpfen, einer sehr variationsreichen Fachterminologie und Widersprüchlichkeiten der Quellen. All das erschwert die Einschätzung.

Um diese Hürden zu nehmen und um Irrtümer und Fehler möglichst zu vermeiden, hat das Projekt Team ein Qualitätsmanagement vereinbart, das für Autoren, redaktionelle Mitarbeiter und Proofreader galt. Ein Workshop in Brüssel im Februar 2019, ein Stylesheet für die Autoren zur Terminologie, ein Template für die Länderkapitel und sorgfältiges Gegenlesen mit mehreren Feedback Runden gehörten dazu. Jedes Kapitel ist von einem Autor geschrieben worden, der jeweils eine eigene Expertise zum Thema mitbrachte. Einige Autoren haben mehrere Kapitel verfasst. Die Kapitel sind dennoch nicht einzelnen Autoren zugeordnet. Auch das trug zur hohen Qualität der Ergebnisse bei und erleichterte die redaktionelle Arbeit. Jedes Kapitel ist durch vier unterschiedliche Prüfungen gegangen:

- eine erste redaktionelle Bearbeitung durch den Koordinator und zwei weitere Mitglieder des Projektteams,
- eine Konsistenzprüfung durch alle Kapitel durch den Koordinator, eine Prüfung des gesamten Textes durch den Koordinator,
- drei Mitglieder des Projektteams und durch zwei externe Proofreader,
- eine abschließende Durchsicht um die Executive Summary zu erstellen.

Die Erstellung dieses Berichtes war eine beachtliche Aufgabe, an der mehr als 12 Experten in eineinhalb Jahren mitgewirkt haben. Auch wenn Autoren, Redakteur und Proofreader große Mühe darauf verwendet haben, alles zu prüfen, können wir nicht garantieren, dass wir eine fehlerfreie Arbeit vorlegen. Wir sind auf jeden Fall dankbar für Hinweise auf Fehler oder Unstimmigkeiten und für mögliche Verbesserungen.

Mit der ersten Ausgabe des **WNWR** versuchen wir, eine Grundlage für die notwendige weitere Arbeit und Forschung zum Thema Atommüll zu schaffen. Neue Fragen und Debatten sind während der Arbeit entstanden, von denen einige in weiteren Ausgaben verfolgt werden sollten. Dazu zählen die absehbar sehr lange Nutzung von Zwischenlagern, die Erschöpfung von Lagerkapazitäten angesichts der ungelösten Endlagerung, Alternativen zur tiefeingeologischen Endlagerung, Proliferation, Terrorismus, Praktiken des Uranabbaus oder die Freimessung von schwachradioaktiven Abfällen zur Mengenreduzierung. Aber auch die Qualität von Standortauswahlverfahren für Endlager und das Verhältnis von Wissenschaftlichen Anforderungen, Partizipation und politischen Entscheidungen. Die nächste Ausgabe sollte auch geografisch weiter ausgreifen. Interessante Länder für zukünftige Ausgaben sind Kanada, China, Japan, Russland, Ukraine, Finnland, Belgien, Bulgarien, Slowakische Republik und Spanien.



1. EINLEITUNG

Kein Land auf der Welt verfügt bis jetzt über ein in Betrieb befindliches Endlager für hochradioaktive Abfälle; Finnland ist das einzige Land, das momentan ein Endlager für diese gefährlichste Art von radioaktiven Abfällen baut. Die meisten Länder müssen noch eine funktionierende Strategie für ein Abfallmanagement für alle Arten von radioaktiven Abfällen entwickeln und implementieren. Deutschland, zum Beispiel, hat gerade nach vier Jahrzehnten der Exploration eines Standorts damit begonnen, einen vollständig neuen Suchprozess zur Auffindung eines Standorts zu initiieren, um diese gefährlichste Art von radioaktiven Abfällen zu lagern. Die französische Regierung hat sich einseitig für eine Einlagerung in tiefen geologischen Schichten im Nordosten von Frankreich entschieden, aber seitdem nehmen die öffentlichen Prozesse kein Ende. In Schweden haben Gerichte das technische Konzept des Betreibers zurückgewiesen und haben damit einen scheinbar fertigen Standort und einen scheinbar fertigen Lagerungsplan auf Eis gelegt.

In mehr als 70 Jahren der Nutzung von Atomkraft zur Stromerzeugung wurden weltweit großen Mengen von radioaktiven Abfällen angehäuft. Wieviel genau und welche Arten von Abfall bleibt unbekannt.

Ein erster Blick auf die Situation zeigt, dass Regierungen weltweit sich nicht nur darum bemühen, Strategien für ein Management von radioaktiven Abfällen zu entwickeln, sondern, dass sie außerdem sehr unterschiedliche Ansätze hierbei verfolgen: wie die Festlegung eines Standorts für ein Endlager, wie die Klassifizierung von radioaktiven Abfällen, welche Sicherheitsstandards von den Betreibern gefordert werden und wie man die Finanzierung sicherstellt, um die ständig anwachsenden Kosten abzudecken. In mehr als 70 Jahren der Nutzung von Atomkraft zur Stromerzeugung wurden weltweit großen Mengen von radioaktiven Abfällen angehäuft. Wieviel genau und welche Arten von Abfall bleibt unbekannt.

In Anbetracht der Tatsache, dass sich Reaktoren überall auf der Welt dem Ende ihrer Lebensdauer nähern und viele Staaten aus der Atomkraft aussteigen – ob sich dies nun durch aktive Politik oder „organisch“ durch eine Nichterneuerung der Betriebsgenehmigung ergibt – werden die Fragen zu Stilllegung und Rückbau der Atomanlagen immer wichtiger im Hinblick auf zusätzliche Herausforderungen in Bezug auf das Management von radioaktiven Abfällen. Die Stilllegung eines einzigen Reaktors dauert durchschnittlich fast 20 Jahre, aber in vielen Fällen noch länger. Es ist klar, dass dieser Prozess zusätzlich große Mengen an radioaktiven Abfällen produzieren wird. Ohne das Vorhandensein von Endlagerstätten muss der größte Teil des abgebrannten Kernbrennstoffs und des sonstigen hochradioaktiven Abfalls über mehrere Jahrzehnte hinweg gelagert werden; dies ist eine erhebliche Herausforderung in Bezug auf die Anforderungen an Sicherheit und Gefahrenabwehr für Zwischenlager und wird sehr viel höhere Kosten verursachen, als dies ursprünglich geschätzt wurde.

Kurz gesagt, es mangelt an Informationen darüber, wo Länder weltweit bei dem Versuch positioniert sind, um die komplexen Herausforderungen anzugehen, die Management und Entsorgung von radioaktiven Abfällen stellen. Dieser Bericht ist ein Versuch, dies zu ändern.

Der **WNWR** hat das Ziel, einen substanziellen Beitrag zum Verständnis der Herausforderungen in Bezug auf radioaktive Abfälle für alle Länder weltweit zu leisten. Dies geschieht durch die Beschreibung von nationalen und internationalen Klassifizierungssystemen, der bereits vorhandenen und geschätzten zukünftigen Abfallmengen, des Managements von radioaktiven Abfällen und der Entsorgungsstrategien der Regierungen und deren Finanzierungsmechanismen.

KAPITEL 2 ENTSTEHUNG UND KLASSIFIZIERUNG beschreibt den Anfall von radioaktiven Abfällen über die gesamte nukleare Brennstoffkette hinweg, die Gewinnung von Uran, über den Betrieb von Anlagen, das Management von abgebrannten Brennelementen bis zum Rückbau der Atomanlagen. Dieses Kapitel erläutert, wie sich die verschiedenen Kategorien von radioaktiven Abfällen in Bezug auf Volumen und Aktivität unterscheiden, und stellt internationale Systeme und nationale Beispiele für die Klassifizierung von radioaktiven Abfällen dar.

KAPITEL 3 ABFALLMENGEN gibt einen Überblick über die Informationspflichten, die Länder gemäß den wesentlichen internationalen Rahmenbedingungen haben, welche auf radioaktive Abfälle Anwendung finden, nämlich das „Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ (auf dieses Gemeinsame Übereinkommen wird in diesem Bericht durchgängig verwiesen). Dieses Kapitel weist eine Schätzung der Abfallmengen auf, die üblicherweise über die nukleare Brennstoffkette generiert werden. Darüber hinaus schätzt dieses Kapitel die momentanen Abfallmengen der europäischen Staaten und vermittelt eine Schätzung der zukünftigen Mengen.

KAPITEL 4 RISIKEN FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT legt die Risiken dar, die durch verschiedene Schritte entlang der nuklearen Brennstoffkette ergeben: der Urangewinnung, -aufbereitung und -anreicherung, der Herstellung von Kernbrennstoff, dem Betrieb von Atomkraftwerken, der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen, der Stilllegung von Atomanlagen und der Lagerung von radioaktiven Abfällen. Das Kapitel fokussiert sich vorrangig auf die Abfälle mit höherer Aktivität und bewertet den Stand der Forschung zu diesen Risiken und stellt potentielle Gefahren und Probleme dar.

KAPITEL 5 KONZEPTE DES MANAGEMENTS RADIOAKTIVER ABFÄLLE überprüft die Ansätze, die die Regierungen im Verlaufe der vergangenen Jahrzehnte zur Handhabung von radioaktiven Abfällen entwickelt haben. Das Kapitel zeigt die Diversität von Entsorgungspfaden auf, die verfolgt wurden und die sich in Bezug auf Lagerstättengestein, Anforderungen für Endlager für schwach- und mittelradioaktiven und hochradioaktiven Abfall und die Option der Entsorgung in tiefen Kernbohrungen unterscheiden. Das Kapitel beschreibt die Herausforderungen durch Zwischenlagerung, welche zunehmend aufgrund des Fehlens von in Betrieb befindlichen Endlagern relevant werden.

KAPITEL 6 KOSTEN UND FINANZIERUNG zeigt die Art der Finanzierungssysteme für die Stilllegung, Zwischenlagerung und Endlagerung auf. Das Kapitel vergleicht die Methodik, um Kostenschätzungen zu entwickeln, und vergleicht diese mit der Praxis in Berichtsländern. Das Kapitel gibt einen Überblick über nationale Finanzierungssysteme für die Stilllegung, Zwischenlagerung und Endlagerung.

KAPITEL 7 LÄNDERSTUDIEN bietet eine Auswahl an Fallstudien, einschließlich der Tschechischer Republik, Frankreich, Deutschland, Ungarn, Schweden, Schweiz, Großbritannien und den Vereinigten Staaten von Amerika (USA). Jeder einzelne Abschnitt beschreibt das nationale Klassifizierungssystem, die betreffenden Mengen an Abfall, die Politik und Einrichtungen in Bezug auf Management radioaktiver Abfälle und die Ansätze zu Kosten und Finanzierung.

In Anbetracht des begrenzten Budgets für das Projekt und die Komplexität der Materie musste der **WNWR** Prioritäten in Bezug darauf setzen, was hierin enthalten sein soll und was nicht:

- Erstens konzentriert sich der **WNWR** geographisch auf Europa und hierbei auf solche Länder, die radioaktive Abfälle produzieren.¹ Allerdings konnten Russland und die Slowakei aufgrund unzureichender Daten nicht systematisch mit einbezogen werden. Im Anschluss an die Übersichtskapitel stellt der Bericht acht spezifische Länderbeispiele dar. Die Länder wurden ausgewählt, um eine breite Palette an Merkmalen, wie z.B. kleine (Tschechische Republik, Ungarn, Schweiz) und große Nuklearstaaten (Frankreich, Großbritannien und Deutschland), alte (Frankreich, Deutschland, Schweden, Großbritannien) und neue EU-Mitgliedsstaaten (Tschechische Republik, Ungarn) sowie einen Nicht-EU-Staat (Schweiz), Länder, die aus der Atomkraft aussteigen (Deutschland, Schweden) und auch solche, die weiterhin Atomkraftwerke bauen (Frankreich, Großbritannien). Der Bericht beinhaltet darüber hinaus das Beispiel der Vereinigten Staaten von Amerika, des größten Nuklearstaats der Welt; dies erlaubt den Vergleich der europäischen Strategien mit solchen eines anderen wesentlichen Akteurs. Es fehlen einige Staaten innerhalb der europäischen Gruppe, nämlich Finnland (mit dem weltweit einzigen, im Bau befindlichen tiefengeologischen Endlagers), Spanien (bei dem es sich um einen wesentlichen Akteur handelt) und Russland (einem Staat, der unzählige Einrichtungen und Wiederaufarbeitungsanlagen betreibt und sich großen Herausforderungen in Bezug auf radioaktive Abfälle aus der Vergangenheit gegenüberstellt). Weltweit gesehen, würde Kanada ein interessanter Kandidat zur Einbeziehung in den Bericht sein (insbesondere aufgrund des groß angelegten Uranabbaus) sowie einige wesentliche Produzenten in Asien (China, Indien, Süd-Korea und Japan).
- Zweitens konzentriert sich der **WNWR** auf radioaktive Abfälle aus den Atomkraftwerken zur Stromerzeugung. Er deckt nicht radioaktive Abfälle aus Bereichen wie Militär, Medizin, Forschung und Industrie ab. Diese Fokussierung ist aus verschiedenen Gründen erfolgt: **a)** die Mengen an radioaktiven Abfällen, die durch die kommerzielle Stromerzeugung produziert werden, einschließlich der Mengen an radioaktiven Abfällen aus der Stilllegung von Atomkraftwerken und aus anderen Einrichtungen entlang der Brennstoffkette, stellen den Löwenanteil des gesamten radioaktiven Inventars dar; **b)** dieser Fokus beinhaltet Abfälle aus abgebrannten Brennelementen, der extrem relevant ist, weil die hierin enthaltenen Radioaktivitätsmengen sehr viel höher sind als in irgendwelchen anderen Nuklearaktivitäten; **c)** alle Länder haben Schwierigkeiten, langfristige Managementstrategien in Bezug auf abgebrannte Brennelemente zu entwickeln. Das Problem des Managements des Abfalls aus der atomaren Stromerzeugung ist deshalb im Wesentlichen mit politischen Entscheidungen verbunden. Radioaktiver Abfall aus den Bereichen Medizin, Industrie und Forschung (MIF) wird in diesem Bericht nur kurz angerissen, obwohl diese Bereiche durchaus mehr Aufmerksamkeit verdienen würden. In ähnlicher Weise wird nur wenig Aufmerksamkeit den Hinterlassenschaften an radioaktiven Abfällen geschenkt, insbesondere den Hinterlassenschaften aus militärischen Aktivitäten, wie der Produktion von Atomwaffen. Das Vergleichen von Ländern mit radioaktiven Abfällen aus militärischen Aktivitäten mit solchen Ländern, die nur über einen Zivilkreislauf verfügen, ist äußerst komplex.²

¹ Die 17 europäischen Staaten, die radioaktive Abfälle aus der Stromerzeugung produzieren, sind Belgien, Bulgarien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Litauen, die Niederlande, Rumänien, Russland, Schweden, die Schweiz, Slowenien, Spanien, die Tschechische Republik, Ukraine und Ungarn.

² In der englischen Ausgabe des WNWR wurde zwischen nuklearen und radioaktiven Abfällen unterschieden um hervorzuheben, dass der Bericht sich auf Abfall konzentriert, der aus zivilen Nuklearaktivitäten entsteht. Der Begriff „radioaktiver Abfall“ wird auch im militärischen Sektor für Abfall aus der Produktion von Atomwaffen oder von Antriebssystemen in der Marine verwendet. Da dies im deutschen Sprachgebrauch nicht üblich ist, verzichten wir in der deutschen Ausgabe des WNWR auf diese Konvention und nutzen den Begriff der „radioaktiven Abfälle“.

- Drittens werden Leser feststellen, dass der **WNWR** keine in die Tiefe gehende Analyse einer Reihe von Fragen in Bezug auf radioaktive Abfälle bietet, die eine weitergehende Betrachtung erfordern. Dies beinhaltet komplexe Fragen, wie die Wiederaufarbeitung und die Bedrohung durch eine Proliferation von Atomwaffen. Es könnte auch sinnvoll sein, die Rolle zu beleuchten, die radioaktive Abfälle in der Vergangenheit in Bezug auf große Atomunfälle, wie Kyshtym, Three Mile Island, Tschernobyl und Fukushima, gespielt haben. Der **WNWR** bietet keine Analyse der sozialen und politischen Fragen in Bezug auf Governance von radioaktivem Abfall. Während wir in jeder Beziehung akzeptieren, dass das Management und die Entsorgung von radioaktiven Abfällen nicht nur einfach ein technisches Problem darstellen, sondern, dass es sich hierbei um profunde soziale und politische Herausforderungen handelt, liegen diese Fragen jedoch außerhalb des Rahmens der ersten Ausgabe des Berichts.

Der Ansatz des **WNWR** ist deskriptiv, empirisch, technisch und analytisch. Es ist beabsichtigt, den momentanen Status einzuschätzen, möglichst genaue Daten zur Verfügung zu stellen und die Ansätze zu beschreiben, die von einer Reihe von industriellen und staatlichen Anlagenbetreibern verfolgt werden, beim Management radioaktiver Abfälle.

Der Bericht zielt allerdings nicht darauf ab, Leser dazu zu veranlassen, bestimmte technische oder politische Positionen zu beziehen oder Empfehlungen für Best-Practice-Ansätze zu entwickeln. Die Untersuchung der Konflikte und Folgen, die den Optionen einer Atompolitik und Abfallstrategie innewohnen, ist nicht das Ziel der Analyse. Die zugrundeliegende Hypothese des Berichts besteht darin, dass das Management und die Entsorgung von radioaktiven Abfällen signifikante und wachsende Herausforderungen darstellen und dass nachhaltige, langfristige Lösungen fehlen. Trotz vieler Pläne und vieler politischer Absichtserklärungen bleiben enorme Unsicherheiten und es werden viele Kosten und Herausforderungen zukünftigen Generationen aufgebürdet.

Der **WNWR** sollte die Möglichkeiten für einen Vergleich zwischen den Ländern bieten, da wir auf ein periodisches Format zum Monitoring der zeitlichen Entwicklungen abzielen. Der Bericht macht Unsicherheitsquellen, wie Inkonsistenzen, Widersprüche und Datenlücken sichtbar. Obwohl wir uns alle Mühe gegeben haben, Konsistenz und Genauigkeit sicherzustellen, bestehen unvermeidliche Probleme im Hinblick auf Kategorisierung, Definition und Informationen, die Vergleiche von Kosten, Risiken, Inventar und Managementansätze oftmals schwierig, manchmal sogar unmöglich machen.

Der vorliegende Bericht ist der erste seiner Art. Mit seiner Fokussierung auf Europa versucht der Bericht, eine signifikante Forschungslücke zu füllen. Außerhalb der EU und Europas gibt es eine noch größere Bandbreite bei der Klassifizierung von radioaktiven Abfällen und den von Betreibern und staatlichen Behörden in Bezug auf radioaktive Abfälle verfolgten Praktiken. Die sozialen, politischen, technischen und finanziellen Hürden auf dem Weg, um eine solide langfristige Lösung für diese speziellen Problemabfälle zu finden, sind hoch.



2. ENTSTEHUNG UND KLASSIFIZIERUNG

Es zeigt sich, dass es keine Sache des gesunden Menschenverstands ist, was genau Abfall im Gegensatz zu nützlichen Substanzen oder nützlichem Material ausmacht. Zum Beispiel sind die Richtlinien der Regierung in Großbritannien sehr komplex in Bezug darauf, ob eine Substanz irgendeine Art von Abfall darstellt. Abfall kann – in dieser Kategorisierung – etwas sein, was der Produzent oder Eigentümer beabsichtigt, zu entsorgen, was einen niedrigen oder negativen ökonomischen Wert darstellt oder gefährlich ist. Allerdings kann in jedem dieser Fälle ein Recycling oder eine Wiederverwendung möglich sein, wodurch sich die relevante Substanz in einen „Nicht-Abfall“ verwandelt.³

Wenn man dies auf den Nuklearsektor anwendet, besteht die wesentliche Frage darin, ob irgendwelche durch Kernreaktionen entstehende Substanzen als Abfall oder als potentielle Ressource betrachtet werden oder nicht. Eine Frage ist beispielsweise, ob abgereichertes Uran aus der Urananreicherung Abfall oder potentielle Ressource ist; und in diesem Fall geht es um Hunderttausende von Tonnen. Allerdings umfasst der hauptsächliche Streitpunkt die Produkte, die bei der „Wiederaufarbeitung“ von abgebrannten Brennelementen aus Atomreaktoren entstehen. Bei der Wiederaufarbeitung werden abgebrannte Brennelemente in deren Bestandteile Plutonium, Uran und diverse Spaltprodukte und Aktiniden sowie in andere Reststoffströme getrennt. Die meisten Wiederaufarbeitungsanlagen, z.B. in Frankreich und Großbritannien, sind eindeutig darauf ausgerichtet, das abgetrennte Plutonium und möglicherweise das wiederaufgearbeitete Uran als Brennstoff in Atomreaktoren zu verwenden. Es wurden bereits auf diesem Wege in verschiedenen Ländern erhebliche Mengen an Plutonium wiederverwendet.

Allerdings könnte man Plutonium aufgrund der unbestreitbaren Gefährlichkeit und/oder des niedrigen oder negativen ökonomischen Wertes als Abfall qualifizieren. Ob Plutonium und wiederaufbereitetes Uran als Abfall oder als Ressource kategorisiert werden, unterscheidet sich von Land zu Land und von Zeit zu Zeit. Zum Beispiel haben offizielle ökonomische Beurteilungen von Atomprojekten in Großbritannien in den 1950er Jahren ein „Plutoniumguthaben“ miteingerechnet. Es war beabsichtigt, den erwarteten Wert des abgetrennten Plutoniums als zukünftigen Kernbrennstoff widerzuspiegeln. Vierzig Jahre später hat sich dieser frühe Optimismus verflüchtigt. Bis Mitte der 1990er Jahre wurde Plutonium in den beiden Haupterzeugerländern, Großbritannien und Frankreich, als „Vermögenswert ohne Wert“ oder als „ohne Buchwert“ klassifiziert, eine für Ökonomen rätselhafte Kategorisierung. In den 2010er Jahren ist der Status von Plutonium unsicher geworden. Die NDA (Nationale Behörde für die Stilllegung von Atomanlagen in Großbritannien) hat erklärt, dass deren bevorzugte Option die Wiederverwendung von Plutonium als Bestandteil von zukünftigem Kernbrennstoff sei.⁴ Es wurde außerdem argumentiert, dass eine geringe Menge an Plutonium als Abfall zu behandeln sei, weil dieser Teil zur Beimischung in sogenannte Mischoxid-Brennelemente (MOX) ungeeignet ist. Falls es sich herausstellen sollte, dass die Wiederverwendung undurchführbar ist, könnte die geplante Immobilisierung für das kontaminierte

³ In der englischen Ausgabe des WNWR wurde zwischen nuklearen und radioaktiven Abfällen unterschieden um hervorzuheben, dass der Bericht sich auf Abfall konzentriert, der aus zivilen Nuklearaktivitäten entsteht. Der Begriff „radioaktiver Abfall“ wird auch im militärischen Sektor für Abfall aus der Produktion von Atomwaffen oder von Antriebssystemen in der Marine verwendet. Da dies im deutschen Sprachgebrauch nicht üblich ist, verzichten wir in der deutschen Ausgabe des WNWR auf diese Konvention und nutzen den Begriff der „radioaktiven Abfälle“.

⁴ NDA, „Progress on approaches to the management of separated plutonium“, Nuclear Decommissioning Authority, Positionspapier, SMS/TS/B1-PLUT/002/A, Januar 2014, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457874/Progress_on_approaches_to_the_management_of_separated_plutonium_position_paper_January_2014.pdf, Stand 11. Juni 2019.

Plutonium auf den gesamten Bestand ausgeweitet werden; zu einem solchen Zeitpunkt würde Plutonium generell unzweifelhaft Abfall sein. In jedem Fall werden die gesamten Nettokosten für das Management von Plutonium in Großbritannien in Höhe von mindestens £ 3 Milliarden (€ 3,5 Milliarden) betragen.⁵ In Frankreich, dem einzigen verbleibenden Land, welches Plutonium in großen Mengen für eine kommerzielle Nutzung abspaltet, bleibt die Wiederaufarbeitung eine gesetzliche Forderung.

Während Plutonium eventuell in einigen Fällen als kurzfristige Ressource erscheinen mag, wird es momentan fast ausschließlich nur in MOX-Brennelementen wiederverwendet; hier führt die Wiederverwendung einfach nur zu einer anderen Form von abgebrannten Brennelementen. Darüber hinaus haben abgebrannte MOX-Brennelemente eine höhere Radioaktivität und sind schwieriger zu handhaben als abgebrannte Brennelemente, bei deren Produktion nur Uran verwendet wurde. Mit anderen Worten: die Wiederaufarbeitung schiebt nur die Abfallfrage auf und macht diese komplizierter.

Die Handhabung der verschiedenen Produkte von Kernreaktionen ist – unabhängig davon, ob diese formal als Abfall eingestuft sind, oder nicht – politisch und sozial umstritten und beinhaltet potentiell hohe Risiken.

Der Punkt hier ist nicht, über den Status von Plutonium oder anderer Materialien zu entscheiden. Es muss stattdessen anerkannt werden, dass die Frage der Handhabung der verschiedenen Produkte von Kernreaktionen – unabhängig davon, ob diese formal als Abfall eingestuft sind oder nicht – politisch und sozial umstritten ist und potentiell hohe Risiken beinhaltet. Während sich dieses Kapitel mit der Palette von Abfallprodukten befasst, die aus Kernreaktionen entstehen, liegt die besondere Bedeutung von abgebrannten Brennelementen darin, dass diese eine 100 Millionen Mal höhere Radioaktivität aufweisen als frische Brennelemente.⁶ Es ist deshalb notwendig, hochradioaktiven Abfällen aus abgebrannten Brennelementen besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

2.1 ABFALLARTEN: DIE KERNBRENNSTOFFKETTE

Radioaktive Abfälle fallen ('Abfallanfall' ist ein in diesem Zusammenhang häufig verwendeter Begriff) in allen Stadien der Kernbrennstoffkette (oftmals als Kernbrennstoffkreislauf bezeichnet) an. Während die Möglichkeit besteht, Thorium als vorrangigen Kernbrennstoff zu verwenden, ist in der Praxis Uran die massiv beherrschende Brennstoffquelle für Atomkraft. Der gesamte hierin beschriebene und klassifizierte radioaktive Abfall stammt letztendlich aus den Prozessen, bei denen Uran momentan zur Stromerzeugung verwendet wird. Es werden keine Abfallarten in Betracht gezogen, die sich ergeben würden, falls Kernfusion jemals eine ernst zu nehmende Stromquelle wäre. Nachfolgend werden die Prozessschritte der Kernbrennstoffkette aufgezeigt (siehe Abbildung 1):

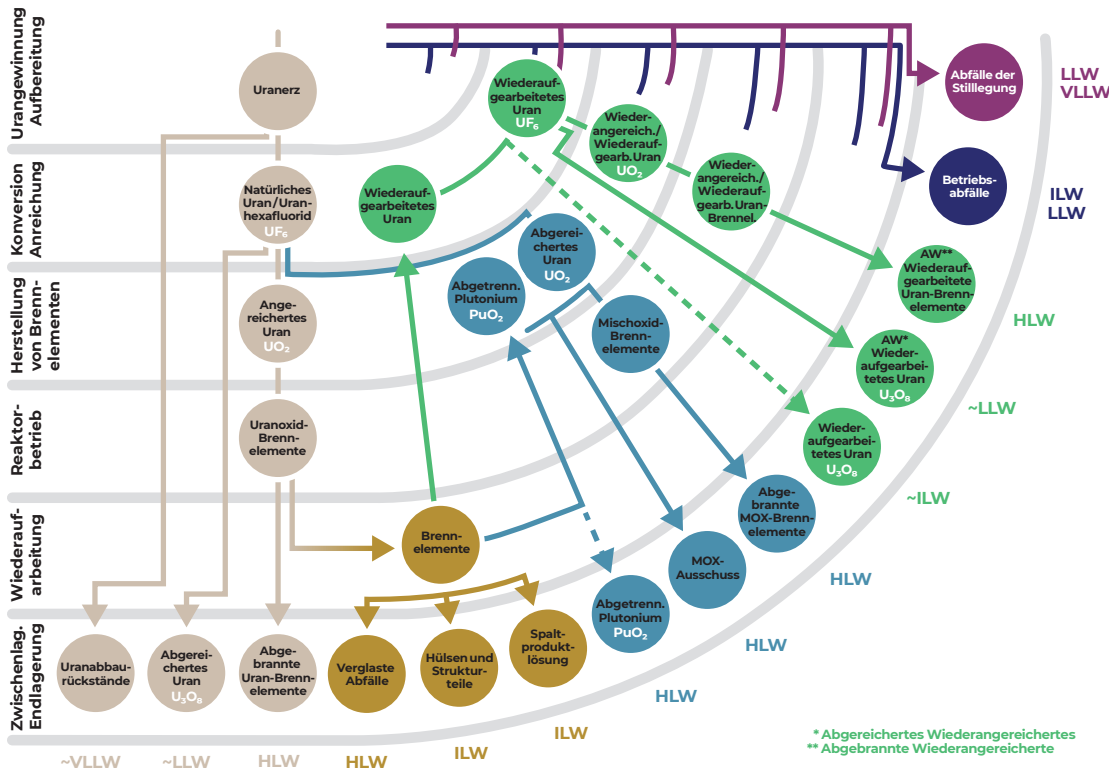
1. Urangewinnung, Aufbereitung, Anreicherung und Brennstoffproduktion.
2. Bestrahlung von Kernbrennstoffen in Leistungs- oder Forschungsreaktoren (Kernfusion).
3. Umgang mit abgebrannten Brennelementen, mit oder ohne Wiederaufarbeitung.
4. Stilllegung von Reaktoren

⁵ NDA, „Plutonium – Credible Options Analysis (Gate A)“, Nuclear Decommissioning Authority, SMS/TS/B1-PLUT/002/A, 2010, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/457827/Plutonium_-_credible_options_analysis_2010_redacted_.pdf, Stand 11. Juni 2019.

⁶ Open University, „Inside Nuclear Energy“, Kurzmodul ST174, 2011.

Die Aktivitäten in Schritt 1 werden häufig als ‘front-end’ der Kernbrennstoffkette bezeichnet. Die Schritte 3 und 4 werden häufig als ‘back-end’ der Kernbrennstoffkette bezeichnet.

ABBILDUNG 1: Die Kernbrennstoffkette



Quelle: WISE-Paris.

Der bei diesen Schritten anfallende Abfall kann gasförmig, flüssig oder fest sein. Bei einigen Arten von gasförmigem Abfall, z.B. Radon in Uranbergwerken, werden Messungen selten versucht, und das Management besteht darin, die Expositionen zu reduzieren, statt existierende Strahlung zu messen oder zu erfassen, obwohl Gase, wie Radon, extrem gefährlich sind. In einigen Fällen wird Radioaktivität aus den Abgasen herausgefiltert und mit flüssigen Ableitungen injiziert ins Meer abgeleitet; hierbei handelt es sich um eine andere Form der Reduzierung der unmittelbaren Exposition, ohne hierbei die Giftigkeit an der Quelle zu vermindern. Feste Abfallarten sind generell die stabilsten und am einfachsten zu handhabenden Abfälle, und ein wesentliches Ziel in den Abfallpolitiken ist es deshalb üblicherweise, weniger stabile Abfallarten in besser handhabbare feste Abfallarten umzuwandeln. Zum Beispiel produziert die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Kernbrennstoffen einen Abfallstrom aus kochender und radioaktiver Salpetersäure, die anschließend einer Verdampfung ausgesetzt und in ein verglastes Produkt umgewandelt wird.

Entlang der Kernbrennstoffkette entsteht eine Vielzahl von Abfallarten:

URANABBAU, AUFBEREITUNG, VERARBEITUNG UND PRODUKTION VON KERNBRENNSTOFF

Eine wesentliche Abfallart und ein großes Gesundheitsrisiko stellt Radongas in Untertage-Lagerstätten von Uran dar. Radongas ist ein Alphastrahler und zerfällt in festes Polonium, welches ähnliche Eigenschaften aufweist. Eine weitere Quelle von Radioaktivität jeglicher Art von Uranabbau ist die ständige Präsenz von Uran, welches in Radon zerfällt, der Abraum und die Abfallhaufen aus entsorgtem Gestein aus den Abbauaktivitäten. Diese Abraumhalden haben ein riesiges Volumen und können zu signifikanten Gesundheitsproblemen führen, insbesondere in Entwicklungsländer, in denen die Management-Konzepte

manchmal schlecht sind. Weil Radon als Gas freigesetzt wird, besteht keine Möglichkeit, dies direkt aufzufangen. Die weiteren Schritte der Uranverarbeitung (Konversion, Anreicherung) und der Produktion von Kernbrennstoff produzieren nur sehr begrenzte Abfallmengen.

KERNSPALTUNG (BRENNSTOFFBESTRAHLUNG)

Bei dem Prozess der Kernspaltung fallen erhebliche Mengen an Abfall als 'Betriebsabfälle' an, und zwar weitestgehend bei der Wartung, bei dem Brennelementwechsel und dem Transport von abgebrannten Brennelementen. Betriebsabfälle beinhalten: Ablagerungen von Brennelementen, einschließlich von Stahl und diversen Legierungen; Kern- oder Wärmetauscherkomponenten im Zusammenhang mit Wartung, Reparaturen oder Sanierungen, welche oft hochradioaktiv sind; kontaminierte flüssige Abfälle und Schlämme; Harze, Filter und Kleidung und Ausrüstung, generell mit einer niedrigen Radioaktivität.

MANAGEMENT VON ABGEBRANNTEN BRENNELEMENTEN

Die Kernspaltung in Reaktoren ist der Bereich der Nukleartechnologie, der die weitaus größten Mengen an Radioaktivität produziert. Die Bestrahlung produziert eine Reihe von Spaltprodukten und Aktiniden, die die Radioaktivität in dem ursprünglichen Uranbrennstoff um mehr als das Hundertmillionenfache vervielfacht. Die Handhabung von abgebrannten Brennelementen – unabhängig davon, ob dies in Form einer Wiederaufbereitung geschieht oder, weil dieser als Abfall für eine mögliche direkte Endlagerung angesehen wird – ist deshalb die mit Abstand wichtigste Abfallmanagement-Aktivität, die sich im Zusammenhang mit der Kernbrennstoffkette ergibt. Zu Anfang müssen die abgebrannten Brennelemente über mehrere Jahre hinweg in einem Abklingbecken im Reaktorgebäude oder in einem Nebengebäude unter Wasser gelagert werden, um die Zerfallswärme zu reduzieren. Wasser bietet darüber hinaus eine gewisse Abschirmung gegen die Strahlung.

Die abgebrannten Brennelemente können später auch zu einer zentralen Nass- oder Trockenlagereinrichtung transportiert werden. Die hauptsächlich zentralen Nasslagerzentren sind die Wiederaufbereitungsanlagen wie Sellafield (GB), La Hague (Frankreich) und Ozersk (Russland). In den letzten zwanzig Jahren wurde die Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen in Trockenbehältern eine üblichere Methode, hauptsächlich an Standorten von Atomkraftwerken.

Wenn Kernbrennstoff wiederaufgearbeitet wird, entstehen große Mengen an weiterem Abfall mit niedriger oder mittlerer Radioaktivität; das bedeutet, dass das gesamte zu handhabende Abfallvolumen (allerdings nicht die Gesamtaktivität) größer ist als bei einer direkten Behandlung der abgebrannten Brennelemente als Abfall. Die verbleibenden Spaltprodukte und Aktiniden in flüssiger Form (nachdem Uran und Plutonium abgetrennt wurden) werden anschließend evaporiert und durch einen Verglasungsprozess vor der beabsichtigten weiteren Lagerung zu Feststoffen umgewandelt. Darüber hinaus ist die Stilllegung von Wiederaufarbeitungsanlagen kostspielig. In den Fällen, in denen abgebrannte Brennelemente direkt als Abfall behandelt wird, wird dieser vor der Endlagerung eingekapselt.

STILLEGUNG VON REAKTOREN (UND ANLAGEN DER KERNBRENNSTOFFKETTE)

Bis heute sind nur sehr wenige Reaktoren oder andere Atomanlagen vollständig rückgebaut worden (wie zum Beispiel ein vollständiger Abriss), und zwar in den Fällen, in denen die Reaktoren bereits vor Jahrzehnten stillgelegt wurden.⁷ Ein Grund für die Verzögerung besteht darin – abgesehen von der offensichtlichen Verschiebung der Kosten –, dass einige in diesen Anlagen enthaltene Radionuklide relativ kurze Halbwertszeiten haben, wodurch der Zugang für den Rückbau zu einem späteren Zeitpunkt ein-

⁷ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „The World Nuclear Industry Status Report 2018“, Mycle Schneider Consulting, September 2018.

facher ist. Allerdings können Verzögerungen die physischen Arbeiten des Rückbaus schwieriger gestalten, und eventuell gehen die entsprechenden Fertigkeiten und die Überwachungskapazität verloren. Die Reaktorgebäude enthalten in ihrem Kern erhebliche Mengen an Radioaktivität, weil viele Komponenten durch Radioaktivität von dem Kernbrennstoff kontaminiert sind, der zusammen hiermit bestrahlt wurde. Große Mengen an Material, wie Stahl und Beton, aus der Stilllegung stellen deshalb radioaktiven Abfall dar, obwohl deren Gesamtradioaktivität im Vergleich zu der Radioaktivität in den abgebrannten Brennelementen gering ist.

2.2 ABFALLMENGEN UND AKTIVITÄT

Die Gesamtmengen und die Radioaktivitätsmengen dieser verschiedenen Kategorien von Abfall sind umgekehrt proportional. Mit anderen Worten: Abfall mit niedriger Aktivität entsteht in großen Mengen, aber trägt nur in geringem Maße zu dem Gesamtinventar an Radioaktivität bei. Im Gegensatz hierzu ist hochradioaktiver Abfall (high-level waste, HLW) in sehr geringen Mengen vorhanden, macht allerdings den weitaus größten Teil der Radioaktivität aus. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, weil die Radioaktivität in abgebrannten Brennelementen, aus dem der HLW entsteht, mehr als hundert Millionen Mal so hoch ist wie die Radioaktivität in frischem Uranbrennstoff.⁸

Abfall mit niedriger Aktivität entsteht in großen Mengen, aber trägt nur in geringem Maße zu dem Gesamtinventar an Radioaktivität bei. Im Gegensatz hierzu ist hochradioaktiver Abfall in sehr viel geringeren Mengen vorhanden, macht allerdings den weitaus größten Teil der Radioaktivität aus.

Dies wird in dem Abfallinventar illustriert, welches der Ausschuss zum Management von radioaktiven Abfällen in Großbritannien in Betracht gezogen hat, als dieser die Politik in Großbritannien im Zusammenhang mit radioaktiven Abfällen in den frühen 2000er Jahren untersucht hat.⁹ Hochradioaktiver Abfall (in diesem Fall einschließlich der abgebrannten Brennelemente, zuzüglich des bei der Wiederaufarbeitung abgetrennten HLW) belief sich auf 96,8 Prozent des Radioaktivitätsinventars, allerdings nur auf 2,6 Prozent des Volumens. Mittelradioaktiver Abfall (intermediate-level waste, ILW) mit sehr viel größeren Volumina enthielt nur 3,2 Prozent der Gesamtradioaktivität, während der Beitrag zur Gesamtaktivität durch schwachradioaktiven Abfall (low-level waste, LLW) weniger als 0,001 Prozent betrug.

2.3 KLASSIFIZIERUNGSSYSTEME UND KATEGORIEN

Die Klassifizierungssysteme für radioaktive Abfälle können den Abfall im Hinblick auf drei Eigenschaften differenzieren:

- Im Hinblick auf das Radioaktivitätsniveau: niedrig, mittel und hoch
- Im Hinblick auf die radioaktive Halbwertszeit: kurzlebig und langlebig
- Im Hinblick auf die Managementoptionen: Art des Zwischenlagers/Endlagers.

⁸ Open University, „Inside Nuclear Energy“, ST174, 2011, op. cit.

⁹ CoRWM, „Managing our Radioactive Waste Safely – CoRWM’s recommendations to Government“, Committee on Radioactive Waste Management, CoRWM doc. 700, Juli 2006, S.20.

Die ersten beiden dieser Eigenschaften betreffen die inhärenten Eigenschaften des Abfalls selbst, während sich die dritte aus den Entscheidungen über die Handhabung ergibt. In der Praxis beziehen sich alle Klassifizierungssysteme auf das Radioaktivitätsniveau und Management, während einige die Halbwertszeiten ignorieren.

Trotz jahrelanger Bemühungen, innerhalb der EU eine Einigung bezüglich eines konsistenten Klassifizierungssystems für radioaktive Abfälle zu erreichen¹⁰, existieren weiterhin ziemlich unterschiedliche Klassifizierungssysteme innerhalb der EU, wobei einige hiervon nachstehend zusammengefasst werden. Allerdings bietet die Allgemeine Sicherheitsrichtlinie zur Klassifizierung von radioaktiven Abfällen der IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation) einen weiten Rahmen der Klassifizierung.¹¹ Dieser stellt eine Standardposition dar; Länder ohne Atomprogramme nehmen diesen Standard fast gänzlich an. Bei Ländern mit signifikanten Atomprogrammen beziehen sich die nationalen Klassifizierungen von Abfall häufig zu Vergleichszwecken auf das IAEA-System.

Die IAEA identifiziert sechs Abfallarten, mit einer Fokussierung auf Feststoffabfall. Es hat geringfügige Auseinandersetzungen in Bezug auf die Management-Strategien für die ersten vier der nachstehend aufgeführten Abfallkategorien gegeben (bis einschließlich schwachradioaktivem Abfall). Während einige Länder langfristige Management-Strategien für in diese Kategorien fallenden Abfall implementiert haben (z.B. Großbritannien und Frankreich), verfolgen andere bestenfalls Strategien zur Zwischenlagerung (wie Deutschland und Japan).

Die wesentlichen Fragen, bei denen sich politische Auseinandersetzungen ergeben und bezüglich derer bis jetzt weltweit noch keine akzeptierten und in Betrieb befindlichen langfristigen Management-Einrichtungen existieren, betreffen die Kategorien mittelradioaktiver Abfall und insbesondere hochradioaktiver Abfall. Die IAEA geht bei der Betrachtung des Verhältnisses von Abfallkategorien zu Management-Optionen davon aus, dass diese Optionen immer in einer Art von verschiedenen landgestützten Endlagermöglichkeiten bestehen. Dies beinhaltet oberirdische Endlagerung und eine Vielzahl von unterirdischen Endlageroptionen; im letztgenannten Fall beinhaltet dies tiefe geologische Endlager.

2.3.1 DIE IAEA-KLASSIFIZIERUNG

Das IAEA-System zieht alle drei vorstehend aufgeführten Eigenschaften in unterschiedlicher Weise in Betracht und definiert die sechs nachstehenden Kategorien:

EXEMPT (EW)

Diese Kategorie betrifft sehr niedrige Konzentrationen von Radionukliden, sodass es nach Meinung der IAEA keine Notwendigkeit für irgendwelche spezifischen Strahlenschutzmaßnahmen gibt. Die IAEA-Sicherheitsrichtlinie schlägt vor, dass diese Abfallart der Kategorie „Exempt“ (aus dem Geltungsbereich atomrechtlicher Vorschriften entlassen) für den Ausschluss oder die Freigabe geeignet ist¹². Im Prinzip kann solches Material von einem Land in ein anderes ohne jegliche Art von regulatorischer Aufsicht transferiert werden.

ABFALL MIT SEHR GERINGER HALBWERTZEIT (VSLW)

Diese Kategorie beinhaltet Radionuklide mit einer sehr kurzen Halbwertszeit, die häufig gelagert werden, bis es deren Aktivitätslevel erlaubt, diese in die Kategorie „Exempt“ herabzustufen. Einige Arten

¹⁰ LLW Repository Ltd, „International Approaches to Radioactive Waste Classification“, Oktober 2016, NSWP-REP-134.

¹¹ IAEA, „Classification of Radioactive Waste“, Internationale Atomenergie-Organisation, General Safety Guide No. GSG-1, 2009, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf, Stand 11. Juni 2019.

¹² In den USA wird für diese Kategorisierung der Begriff Below Regulatory Control (unterhalb der für die Aufsicht relevanten Minimalbelastung) oder BRC verwendet.

von gasförmigem und flüssigem Abfall werden als VSLW (very short lived waste) kategorisiert. Im Allgemeinen besteht die empfohlene Management-Strategie darin, dieses Material bis zum Zerfall zu lagern, und es wird vorgeschlagen, dass dies für Radionuklide mit Halbwertszeiten in der Größenordnung von 100 Tagen oder weniger Anwendung findet.

SEHR SCHWACHRADIOAKTIVER ABFALL (VLLW)

Innerhalb diese Kategorie fallen wesentliche Mengen an Abfällen durch den Betrieb und die Stilllegung von Atomanlagen an; außerdem handelt es sich hierbei um Abfälle, die beim Abbau und bei der Verarbeitung von Uranerzen anfallen. Die Handhabung dieses Abfalls erfordert – im Gegensatz zu den vorstehend aufgeführten beiden Kategorien – uneingeschränkter Schutz und Sicherheit gegen Strahlung. Die charakteristischen Aktivitätswerte der Radionuklide, die in diese Kategorie fallen, liegen zwischen dem Zehn- und Hundertfachen der Werte für die Abfallart „Exempt“. Die IAEO empfiehlt, dass das sichere Management für VLLW (very low-level waste) angelegte Deponien involviert, die aktive und passive institutionelle Kontrollen über einen erheblichen, jedoch nicht-spezifizierten Zeitraum erfordern.

Viele nationale Klassifizierungssysteme erkennen die Kategorien „Exempt“ und „VSLW“ nicht an, und einige Länder, wie z.B. die USA, lehnen die Vorstellung ab, dass irgendwelche radioaktiven Materialien aus einer regulatorischen Aufsicht herausfallen sollten.

SCHWACHRADIOAKTIVER ABFALL (LLW)

Schwachradioaktiver Abfall (LLW, low-level waste) ist definiert als eine Abfallart mit einem Radioaktivitätswert, der für eine oberflächennahe oder unterirdische Entsorgung niedrig genug liegt, wenn die Entsorgungsstätten eine robuste Umhüllung und Isolierung für einen Zeitraum bieten, der durch die IAEO als „begrenzte Zeiträume“ beschrieben ist. Allerdings zeigt es sich, dass diese begrenzten Zeiträume bis zu einem Zeitraum von mehreren Hundert Jahren reichen. In einer Anzahl von Ländern wird von der willkürlichen Annahme ausgegangen, dass man sich für Zeiträume von bis zu dreihundert Jahren auf institutionelle Kontrollen verlassen kann. Allerdings verringern sich die Aktivitätswerte für Abfall aus dem Abbau und der Verarbeitung von Uran nur langsam, sodass man eine Kontrolle für längere Zeiträume als dreihundert Jahre fordern muss (und die Endlagerung in oberflächennahen Einrichtungen ist in Schwellenländern selten).

Diese Kategorie deckt ein sehr breites Spektrum an Abfall ab und kann Abfallarten von langlebigen Radionukliden mit niedriger Radioaktivität enthalten. Typische Materialien, die in die Kategorie LLW fallen, beinhalten Kleidung, Verpackungsmaterial, Böden und wesentliche Produkte der Reaktorstilllegung, wie Stahl und Rohrleitungen. In Abhängigkeit von der genauen Zusammensetzung der Abfälle empfiehlt die IAEO Entsorgungspraktiken, die von einer oberirdischen Lagerung bis zu einer unterirdischen Lagerung in Tiefen von bis zu 30 m reichen. Genaue Grenzen zwischen LLW und der nächsten Kategorie (mittelradioaktiver Abfall oder ILW) werden generisch nicht vorgegeben, da vieles von den Eigenschaften der verschiedenen Arten der Konstruktion der Entsorgungseinrichtungen abhängt. Einige Länder haben die Entsorgung von LLW und kurzlebigen ILW mit der geplanten separaten Endlagerung von langlebigem ILW kombiniert. Für die vorgenannten Abfallkategorien existieren für die meisten Länder in Betrieb befindliche Anlagen, um diesen Abfall zu handhaben.

MITTEL-RADIOAKTIVER ABFALL (ILW)

Dies ist Abfall mit einer höheren Radioaktivität als LLW und dieser Abfall beinhaltet relativ große Mengen an langlebigen Radionukliden. Deswegen besteht eine Notwendigkeit, Anlagen zu konzipieren, die nicht von langfristigen institutionellen Kontrollen abhängig sind. Allerdings entwickelt ILW (interme-

diate-level waste) keine Wärme durch radioaktiven Zerfall und muss deshalb bei der Handhabung den Faktor Wärme nicht in Betracht ziehen. Charakteristische Quellen von ILW sind Brennstoffhüllen, einige Reaktorkomponenten während der Stilllegung und verschiedene Arten von Schlämmen aus der Behandlung von radioaktiven Abwässern. Darüber hinaus fallen in den Fällen, in denen abgebrannte Brennelemente wiederaufgearbeitet werden, auch große Mengen an ILW an.

Heutzutage wird dieser Abfall in den meisten Fällen in Materialien auf Zementbasis verpackt und mit großen Fässern oder Containern umhüllt, die oftmals aus Stahl bestehen. In Frankreich stammen zehntausende bituminierte Abfallgebände aus den frühen kommerziellen Wiederaufarbeitungsaktivitäten, die nicht für eine Endlagerung geeignet sind und deshalb eine komplexe, teure Konditionierung benötigen. Die IAE0 empfiehlt die unterirdische Endlagerung in Tiefen zwischen wenigen zehn und wenigen hundert Metern, und zwar in Lagerstätten, bei denen natürliche geologische Barrieren und technische Barrieren das Potential haben, eine Isolierung der oberirdischen Umgebung über lange Zeiträume hinweg zu erreichen.

HOCHRADIOAKTIVER ABFALL (HLW)

Hochradioaktiver Abfall (HLW, high-level waste) ist die Kategorie, die die Abfälle mit der höchsten Radioaktivität umfasst. Diese Kategorie beinhaltet hohe Konzentrationen von kurzlebigen und langlebigen Radionukliden. Dieser Abfall wird auch als Abfall definiert, der signifikante Wärmemengen aus dem radioaktiven Zerfall generiert und der dies für lange Zeiträume in die Zukunft hinein weiterhin tun wird. Deshalb muss Wärmeabfuhr bei der Auslegung der Management-Konzepte in Betracht gezogen werden. Viele amtliche und unabhängige Experten sind der Meinung, dass eine tiefengeologische Endlagerung in stabilen geologischen Formationen und unter zusätzlicher Verwendung von diversen technischen Barrieren erforderlich ist, um zu versuchen, sicherzustellen, dass die Möglichkeiten, dass die Radioaktivität in die Biosphäre gelangt, extrem gering sind.

Im Wesentlichen fällt HLW bei der Kernspaltung (der Bestrahlung von Brennelementen) an, und dieser Abfall wird entweder als abgebrannte Brennelemente, wobei dieser direkt als Abfall oder als bei der Wiederaufarbeitung abgespaltene Aktinidenströme und Spaltprodukte behandelt wird.

2.3.2 DIE EU-KLASSIFIZIERUNG

Die EU besitzt für alle Mitgliedsstaaten einige aufsichtsrechtliche Befugnisse in diesem Bereich. Die Richtlinie von 2011 „für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle“ legt generische Ziele für das Management radioaktiver Abfälle fest.¹³ Die EU hat keine Befugnisse, einen gemeinsamen Prozess der Abfallklassifizierung für alle Mitgliedsstaaten zu fordern, aber sie hat die Daten der Mitgliedsstaaten in ein eigenes gemeinsames System auf der Basis der vorstehend beschriebenen IAE0-Kategorien übertragen. Außerdem hat die EU-Kommission bereits im Jahre 1999 Empfehlungen für Abfallklassifikationssysteme für alle Mitgliedsstaaten auf der Grundlage des IAE0-Systems veröffentlicht (diese wurden 2008 ergänzt).¹⁴

¹³ Europäische Union, „Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle“, *Amtsblatt der Europäischen Union*, 19. Juli 2011.

¹⁴ Europäische Kommission, „Empfehlung der Kommission vom 15. September 1999 für ein Klassifizierungssystem für feste radioaktive Abfälle (SEK (1999) 1302 endg.)“, 99/669/EC, *Amtsblatt Nr. L 265*, 13. Oktober 1999, S. 0037 - 0045, S. A37-45, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:51999SC1302>, Stand 11. Juni 2019.

Dieses System beinhaltet die nachfolgenden fünf Kategorien:

- „Transition Waste“ (entspricht kurzlebigen, schwachradioaktiven Abfällen);
- Sehr schwachradioaktive Abfälle;
- Kurzlebige (Halbwertszeit weniger als 31 Jahre), schwachradioaktive und mittelradioaktive Abfälle;
- Langlebige (Halbwertszeit mehr als 31 Jahre), schwachradioaktive und mittelradioaktive Abfälle;
- Hochradioaktive Abfälle (wärmeentwickelnd).

Der wesentlichste Unterschied zu dem IAEA-System ist die Aufteilung von LLW und ILW in kurzlebige und langlebige Kategorien, welche Auswirkungen auf die Management-Strategien hat. Allerdings ist kein EU-Mitgliedsstaat diesem empfohlenen System genau gefolgt, obwohl Frankreich, Schweden und die Tschechische Republik diesem System sehr nahekommen, insbesondere in Bezug auf die Unterscheidung zwischen kurzlebigen und langlebigen Abfällen.

Nachstehend werden vier Beispiele beschrieben, um die Vielfalt der in der EU verwendeten nationalen Klassifizierungssysteme exemplarisch aufzuzeigen. Diese wurden nach zwei Kriterien ausgewählt: Es existieren substantielle Abfallmengen für alle Aktivitätslevel; und sie illustrieren die Verschiedenheit der Ansätze, die die unterschiedlichen nationalen Regierungen in Bezug auf Klassifizierungsfragen verfolgen. Es gibt natürlich viele andere Systeme innerhalb der EU. Außerhalb der EU existiert eine noch größere Bandbreite bei der Abfallklassifizierung. Deswegen folgt eine kurze Beschreibung eines anderen nationalen Systems eines Staates mit substantiellen Abfallmengen (USA). Dies illustriert die noch größere Vielfalt von Klassifikationssystemen außerhalb der EU.

2.3.3 BEISPIELE VON NATIONALEN KLASSIFIZIERUNGEN

DEUTSCHLAND: Das deutsche Klassifizierungssystem ist relativ einfach.¹⁵ Dieses System unterscheidet zwei hauptsächliche Kategorien auf der Grundlage der Anforderungen an die Endlagerung: wärmeentwickelnde Abfälle und sonstige, beschrieben als Abfälle mit einer zu vernachlässigenden Wärmeentwicklung. Die erste Kategorie entspricht der IAEA-Kategorie HLW (einschließlich von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen und den abgebrannten Brennelementen selbst), wobei die zweite Kategorie letztendlich einer Kombination der IAEA-Kategorien ILW und LLW darstellt. Die deutsche Politik besteht darin, beide Kategorien von Abfällen in tiefengeologischen Endlagern, allerdings an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen, zu lagern.

FRANKREICH: Das französische System ist komplexer als das deutsche System. Dieses System verwendet fünf hauptsächliche Kategorien, unter Ausblendung der Kategorie VSLW.¹⁶ Das französische System fügt dem IAEA-System jeder Abfallkategorie die Halbwertszeit hinzu.

¹⁵ LLW Repository Ltd., „International Approaches to Radioactive Waste Classification“, National Waste Programme, NSWP-REP-134, Oktober 2016, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/697667/NWP-REP-134-International-Approaches-to-RW-Classification-Oct-2016.pdf, Stand 11. Juni 2019.

¹⁶ Autorité de Sûreté Nucléaire und Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, „Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018 (PNGMDR)“, 25. Februar 2017.

Die einzelnen Kategorien sind:

- Sehr schwachradioaktive Abfälle (VLLW);
- Schwach- und mittelradioaktive Abfälle (kurzlebig) (LILW-SL);
- Schwachradioaktive Abfälle (langlebig) (LLW-LL);
- Mittelradioaktive Abfälle (langlebig) (ILW-LL);
- Hochradioaktive Abfälle (wärmeentwickelnd) (HLW).

In diesem System entsprechen nur die erste und die letzte Kategorie (VLLW und HLW) weitestgehend der IAEO-Klassifizierung. In Bezug auf LLW und ILW berücksichtigt das französische System die Langlebigkeit der potentiellen Gefahren, die durch die verschiedenen Abfallarten und den ursprünglichen Aktivitätslevel hervorgerufen werden, wodurch zusätzliche Unterscheidungen zu schaffen sind, als diese von der IAEO in Bezug auf ILW und LLW vorgenommen werden. In Übereinstimmung mit den EU-Richtlinien kategorisiert das französische System Abfälle als kurzlebig (SL, short-lived), wenn deren Halbwertzeiten kürzer als 31 Jahre sind, und als langlebig (LL, long-lived), wenn deren Halbwertzeiten 31 Jahre übersteigen. Diese zweite Dimension (Halbwertzeit) besteht in Bezug auf die französische Entsorgungspolitik. Während man davon ausgeht, dass HLW und ILW (langlebig) in beiden Fällen in tiefengeologischen Endlagern entsorgt werden, wird erwartet, dass ILW (kurzlebig) und LLW (langlebig) in oberflächennahen Endlagern gehandhabt werden.

GROßBRITANNIEN: Im Vergleich zu Frankreich und Deutschland ist das in Großbritannien verwendete System näher an das IAEO-System angelehnt.¹⁷ Die vier Kategorien dieses Systems entsprechen den letzten vier Kategorien, die vorstehend in Bezug auf die IAEO aufgeführt sind, und zwar:

- Sehr schwachradioaktive Abfälle (VLLW);
- Schwachradioaktive Abfälle (LLW);
- Mittelradioaktive Abfälle (ILW);
- Hochradioaktive Abfälle (wärmeentwickelnd, überwiegend Abfall aus der Wiederaufarbeitung) (HLW).

Während dies die hauptsächlichen, in Großbritannien existierenden, Abfallkategorien sind, gibt es darüber hinaus eine weitere Unterscheidung, die im engen Zusammenhang mit den momentanen Entsorgungsoptionen stehen:

- Hochradioaktive Abfälle, definiert als HLW, ILW und der Teil von LLW, der momentan nicht endlagerbar ist. Zum jetzigen Zeitpunkt existieren für diese Abfälle keine langfristigen Management-Konzepte.
- Schwachradioaktive Abfälle. Hierbei handelt es sich größtenteils um LLW und VLLW; all diese Abfälle werden momentan in oberirdischen, gebauten Anlagen gelagert.

¹⁷ LLW Repository Ltd., „National Waste Programme–International Approaches to Radioactive Waste Classification“, National Waste Programme, NSWP-REP-134, Oktober 2016, op. cit.

Tschechische Republik: Von den erst kürzlich beigetretenen EU-Mitgliedsstaaten hat die Tschechische Republik die größten Mengen an radioaktiven Abfällen. Deren Klassifizierungssystem ist dem französischen System und den Empfehlungen der EU ähnlich.¹⁸ Hier existiert die nachfolgende Kategorisierung:

- „Transition Waste“ und VLLW (entspricht kurzlebigen, sehr schwachradioaktiven Abfällen);
- Schwachradioaktive Abfälle (kurzlebig) (LLW-SL);
- Mittelradioaktive Abfälle (langlebig) (ILW-LL);
- Hochradioaktive Abfälle (wärmeentwickelnd) (HLW).

USA: In den USA existieren zwei verhältnismäßig unterschiedliche Arten von Kategorien: eine für die Abfälle militärischer Herkunft und die andere für Abfälle ziviler Herkunft. Das verwendete System für Abfälle ziviler Herkunft definiert fünf Kategorien.¹⁹

- Abfallhalden aus Uranabbau;
- Schwachradioaktive Abfälle, welche anschließend in vier weitere Kategorien unterteilt werden (eine hiervon würde als ILW bei dem IAEO-System klassifiziert);
- Transurane Abfälle;
- Abgebrannte Brennelemente;
- Hochradioaktive Abfälle: Produkte aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen.

Während das in den USA verwendete System einige Kategorien anerkennt, die denen der IAEO ähnlich sind (wie HLW), unterscheidet sich dieses System fundamental von allen anderen Systemen in Bezug darauf, dass dieses System die Klassifizierung auf der Herkunft der Abfälle basiert und nicht auf den Eigenschaften oder den Risiken, die sie darstellen. Die LLW-Kategorie beinhaltet auch Material, welches gemäß der IAEO-Klassifizierung als VLLW und VSLW zählen würde, weil das in den USA verwendete System keinerlei radioaktive Abfälle anerkennt, die von den aufsichtsrechtlichen Kontrollen ausgenommen sind. Die vier Kategorien von LLW beziehen sich auf das Ausmaß, in dem die speziellen Abfälle in Bezug stehen zu dem Schutz der Öffentlichkeit und in Bezug auf Personen, die unabsichtlich auf das Gelände der Entsorgungsstätte gelangen.

¹⁸ Ibidem

¹⁹ Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, „Report to the Secretary of Energy“, Januar 2012, S. 96, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf, Stand 2. August 2019.

2.4 ZUSAMMENFASSUNG

Was genau Abfall ausmacht, scheint sich nicht dem gesunden Menschenverstand zu erschließen. Einige Länder definieren bestimmte Produkte aus Kernreaktionen als Abfälle, andere als potentielle Ressourcen. Zum Beispiel Plutonium wird in vielen Ländern aufgrund der Gefährlichkeit und des geringen oder negativen ökonomischen Wertes als Abfall klassifiziert. Frankreich allerdings verlangt per Gesetz die Wiederaufarbeitung und trennt deshalb Plutonium in großen Mengen für eine kommerzielle Verwendung. Eine Wiederaufarbeitung verschiebt die Abfallfrage und macht diese zusätzlich komplizierter. Das Management der diversen Produkte aus Kernreaktionen ist – unabhängig davon, ob diese als Abfall klassifiziert sind oder nicht – politisch und sozial umstritten und birgt potentiell hohe Risiken.

Die Klassifizierungssysteme für radioaktive Abfälle können die Abfälle in drei verschiedenen Eigenschaften unterscheiden: in Bezug auf die Höhe der Radioaktivität (schwach, mittel und hoch), in Bezug auf den Zeitraum des radioaktiven Zerfalls (kurzlebig und langlebig) und in Bezug auf das Management-Konzept (Art der Zwischenlager und Endlager). Obwohl schwachradioaktive Abfälle in großen Mengen anfallen, haben diese nur geringe Radioaktivitätswerte. Dies ist zum Beispiel der Fall für Stahl und Beton aus der Stilllegung und dem Rückbau. Umgekehrt fallen hochradioaktive Abfälle in geringen Mengen an, aber stellen den weitaus größten Teil des Radioaktivitätsinventars dar und erzeugen signifikante Wärmemengen, wie z.B. abgebrannte Brennelemente.

Die Internationale Atomenergiebehörde bietet einen breiten Klassifizierungsrahmen für radioaktive Abfälle. Das „Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ stellt eine Standardposition für viele Länder dar. Mit der EU-Richtlinie 2011/70/EURATOM von 2011 hat die EU den Versuch unternommen, die Abfall-Klassifizierungssysteme für die Mitgliedstaaten zu harmonisieren, allerdings nur mit begrenztem Erfolg. Kein Mitgliedstaat hat die Empfehlungen genau befolgt, wobei Frankreich, Schweden und die Tschechische Republik dem am nächsten gekommen sind.

Insgesamt gesehen, unterscheiden sich die Länder in Europa erheblich in Bezug auf die Klassifizierungssysteme für radioaktive Abfälle. Erstens unterscheiden sie sich darin, ob abgebrannte Brennelemente und einige der potentiell getrennten Produkte (Plutonium und Uran) Abfälle oder Ressourcen darstellen. Zweitens gibt es erhebliche Unterschiede bei den Klassifizierungen der Abfälle, wobei es keine zwei Länder gibt, die identische Systeme haben. Während alle Länder bezüglich der Kategorie von wärmeentwickelnden (hochradioaktiven) Abfällen übereinstimmen, existieren verschiedene alternative Wege der Charakterisierung anderer nuklearer Abfallströme. Einige Länder unterscheiden zwischen kurz- und langlebigen Abfällen, sowohl mit niedrigen als auch mittleren Radioaktivitätswerten, während andere Länder die Kategorien „schwach“ und „mittel“ verwenden, ohne hierbei zwischen kurz- und langlebig zu unterscheiden. Einige Systeme basieren weitestgehend auf der Herkunft der Abfälle, einige auf potentiellen oder tatsächlichen Lagereinrichtungen oder sonstigen Management-Konzepten und noch andere auf einer Mischung aus Aktivitätswerten und Halbwertszeiten. Diese Unterschiede machen einen Vergleich der Klassifizierungssysteme zwischen den Ländern hochkompliziert.



3. ABFALLMENGEN

Nach mehr als 70 Jahren der Verwendung von Atomkraft zur Stromerzeugung sind weltweit große Mengen an radioaktiven Abfällen angefallen. Trotz des Fehlens angemessener Endlager wird weiterhin radioaktiver Abfall produziert, was zu einer stetig steigenden Lagermenge von radioaktiven Abfällen führt.

3.1 BERICHTSPFLICHTEN

Weltweit sind Management und Berichtspflichten in Bezug auf radioaktive Abfälle durch nationale Gesetzgebungen und internationale Konventionen geregelt. Innerhalb der EU sind die wesentlichen Rahmenbedingungen durch die Richtlinie 2011/70/EURATOM über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle festgelegt. Deren Anforderungen basieren auf dem Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle der IAEO (siehe nachstehend). Im Jahre 2015 waren die EU-Mitgliedstaaten zum ersten Mal verpflichtet, der EU-Kommission ein Abfallinventar und eine Strategie für deren Management-Programm für radioaktive Abfälle einzureichen. Die EU-Mitgliedstaaten müssen anschließend alle drei Jahre einen Bericht bezüglich der Implementierung der Richtlinie 2011/70 vorlegen. Zwei Jahre später, im Jahre 2017, hat ein Bericht der Europäischen Kommission die von den EU-Mitgliedstaaten berichteten Inventare in das gemeinsame IAEO GSG-1 Klassifizierungssystem von sehr schwachradioaktiven Abfällen (very low-level waste, VLLW), schwachradioaktiven Abfällen (low-level waste, LLW), mittelradioaktiven Abfällen (intermediate-level waste, ILW) und hochradioaktiven Abfällen (high-level waste, HLW) umgewandelt.²⁰ Der Bericht hat gezeigt, dass sich die Abfallmengen in der EU ständig erhöhen und dass angemessene Endlager begrenzt sind.²¹

Das „Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ von 2001 (hiernach als Gemeinsames Übereinkommen bezeichnet) ist das erste Rechtsinstrument, um das Problem des Managements von abgebrannten Brennelementen und Abfällen durch die Festlegung von Sicherheitsprinzipien und durch die Schaffung eines „peer review process“ (Begutachtungsverfahren) zur Konvention zu Nuklearer Sicherheit anzugehen.²² Die Vereinbarung mit der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) beinhaltet die Anforderung an eine Liste der Anlagen für abgebrannte Brennelemente (SNF, Spent Nuclear Fuel) und das Management für radioaktive Abfälle und eine Inventarliste der Menge an SNF und radioaktiven Abfällen (Artikel 32). Diese einzelstaatlichen Berichte sollten für jedes Review Meeting eingereicht werden, welches spätestens drei Jahre nach dem vorherigen Meeting stattfinden muss (Artikel 30). Die nationalen Berichte aus dem sechsten Review Meeting (im Jahre 2018) sind die vorrangige Quelle für die Abfallmengen in Kapitel 3.3.²³

²⁰ IAEO, „Classification of Radioactive Waste“, General Safety Guide No. GSG-1, 2009.

²¹ Europäische Kommission, „Inventory of radioactive waste and spent fuel present in the Community's territory and the future prospects“, SWD(2017) 161, 15 Mai 2017, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017SC0161&from=EN>, Stand 12. Juni 2019.

²² IAEO, „Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“, 2001, <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/joint-convention-safety-spent-fuel-management-and-safety-radioactive-waste>, Stand 11. Juni 2019.

²³ Die nationalen Berichte sind auf der folgenden IAEO-Webseite einsehbar: https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/joint-convention-safety-spent-fuel-management-and-safety-radioactive-waste/documents?keywords=&type=4797&language=All&field_extres_date_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&country=All.

3.2 ABFALLMENGEN ENTLANG DER VERSORGUNGSKETTE

URANABBAU UND BRENNELEMENTEHERSTELLUNG

Um Uran als Brennstoff zur Stromerzeugung in Atomreaktoren zu verwenden, muss Uranerz (eine natürliche Ressource) mehrere Verarbeitungsschritte durchlaufen. Zuerst muss das Erz abgebaut, von Abfallmaterial getrennt und verarbeitet werden, um sogenannten „yellow cake“ (Urankonzentrat) zu produzieren; dieses Konzentrat wird dann zu Uranhexafluorid umgewandelt, angereichert und zu Brennelementen produziert.

Bei allen diesen Prozessen fallen radioaktive Abfallstoffe an. Die ersten anfallenden Abfallstoffe sind die Abraumhalden (abgebautes Gestein, um an das Uranerz zu gelangen, in Form von Schotter was dann Schlämme bildet) an dem Bergwerk. Sechs Länder liefern ca. 85 Prozent des weltweit abgebauten Urans: Kanada, Kasachstan, Australien, Niger, Namibia und Russland.²⁴ Der Urananbau (und die nachfolgenden Prozesse) produzieren große Mengen an radioaktiven Abfällen in den exportierenden Ländern, in denen nur Kanada und Russland Atomkraftwerke betreiben. Frankreich, Russland, Kanada, China und die USA wandeln kommerziell Yellow Cake in Uranhexafluorid (UF₆) um. England, Frankreich, Deutschland, die Niederlande, Russland, Japan und die USA stellen kommerzielle Anreicherungsdienstleistungen zur Verfügung. Uranhaltiger Abfall fällt in beiden Schritten an.

BETRIEBSABFÄLLE

Der Betrieb von Atomkraftwerken zur Stromerzeugung produziert verschiedene Arten von radioaktiven Abfällen in unterschiedlichen physikalischen Formen, wobei der Löwenanteil auf schwach- und mittelradioaktiven Abfälle (LILW, low- and intermediate-level waste) entfällt. Die IAEO klassifiziert Betriebsabfälle in zwei hauptsächliche Kategorien: nicht-konditionierte (wie produziert) und konditionierte Betriebsabfälle. Für nicht-konditionierte Betriebsabfälle ist die Angabe des physikalischen Zustands (wie flüssig oder fest) wichtig:²⁵

- Rohabfälle (Abfälle im Originalzustand) sind nicht konditioniert und werden häufig in Tonnen für Feststoffe und in Kubikmetern (m³) für Flüssigabfälle aufgeführt.²⁶
- Aber diese Kategorie beinhaltet auch vorbehandelte Abfälle. Diese Abfälle wurden bereits in irgendeiner Form einer Vorbehandlung unterzogen und werden häufig in Tonnen für Feststoffe und m³ für Flüssigabfälle aufgeführt.

Um die Abfälle in eine stabile und feste Form zu bringen und um diese für den Transport, die Lagerung und die letztendliche Endlagerung geeignet zu machen, müssen diese konditioniert werden. Außerdem erfolgt eine Abfallverdichtung, um die Abfallvolumen zu limitieren; die Verdichtung kann Teil der Konditionierung sein, allerdings muss dies nicht der Fall sein.²⁷

²⁴ Roman Mendelevitch und Thanh Thien Dang, „Nuclear power and the uranium market: Are reserves and resources sufficient“, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Politik im Fokus Nr. 98, 9 Juni 2016.

²⁵ Feststoffabfälle sind z.B. Kleidung, ausgetauschte Anlagenkomponenten oder Isoliermaterial. Flüssige Abfälle sind z.B. kontaminiertes Kühlwasser, Öle, Verdampferkonzentrate, Filtersubstanzen oder Schlämme, die anfallen, wenn sich Feststoffe als Sediment im unteren Teil des Pumpengehäuses ansammeln. Siehe IAEO, „Categorizing Operational Radioactive Wastes“, IAEA-TECDOC-1538, April 2007.

²⁶ Oder Megagramm (Mg) Schwermetall (HM).

²⁷ Wegen weiterer Einzelheiten zu Abfallproduktion, siehe F. Homberg, M. Pavageau und M. Schneider, „Cogema – La Hague: The Waste Production Techniques“, Greenpeace International, Mai 1997.

- Eine zusätzliche Kategorie sind konditionierte Abfälle, die aus Gründen der Sicherheit oder Akzeptanz oder aus beiden Gründen aufgearbeitet und erneut konditioniert werden müssen.²⁸
- Nach der Konditionierung werden die Abfälle in Fässern, Lager-, Transport- oder Entsorgungsbehältern gelagert. Die gelagerten Abfälle werden in m³, in metrischen Tonnen oder in der Anzahl der Behälter oder Fässer aufgeführt.
- Eine letzte Abfallkategorie ist endgelagerter Abfall. In Europa haben nur weniger als die Hälfte der Atomstaaten Endlager für LILW eingerichtet (Großbritannien, Frankreich, Spanien, Ungarn, Finnland, Tschechische Republik, Schweden). Endgelagerte Abfälle werden häufig in m³ oder Abfallgebinden oder -behältern aufgeführt.

Der Abfallanfall ist abhängig von vielen Faktoren, wie z.B. der verwendeten Reaktortechnologie und dem Alter des Reaktors. Die IAEO gibt einen Überblick über den Abfallanfall von nicht-konditioniertem LILW pro Gigawatt (GW)²⁹ Nuklearleistung je Reaktortechnologie:³⁰

- Schwerwasser-Druckreaktor (PHWR): 200 m³
- Leichtwasserreaktor:³¹
 - Druckwasserreaktor (PWR): 250 m³
 - Siedewasserreaktor (BWR): 500 m³
 - PWR VVER: 600 m³
- Schneller Brüter (FBR): 500 m³
- Fortgeschrittener Siedewasserreaktor (ABWR): 500 m³
- Fortgeschrittener Gasgekühlter Reaktor (AGR): 650 m³
- Gasgekühlter Leichtwasserreaktor (RBMK): 1.500 m³
- Gasgekühlter Reaktor (GCR): 5.000 m³

²⁸ Zum Beispiel bituminierte Schlämme aus der Wiederaufarbeitung, bei denen sich die Länder von Kunden von AREVA weigern, diese zurückzunehmen und bei denen es sich herausstellt, dass diese unterhalb der Spezifikationen für die Endlagerung in Frankreich liegen.

²⁹ Die Einheiten Gigawatt oder Megawatt (MW) beschreiben die installierte Leistung von Kraftwerken zur Stromerzeugung. Diese kann auch als Gigawatt elektrische Leistung (GWe) bezeichnet werden. Ausgenommen dies wird anderweitig erläutert, verwendet dieser Bericht GW und MW.

³⁰ IAEO, „Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials“, IAEA-TECDOC-1591, 2007.

³¹ Ungefähr 80 von den weltweit mehr als 400 Atomreaktoren sind PWR oder BWR.

Diese Schätzungen beziehen sich auf nicht-konditionierte Abfälle; die Schätzungen für die Erzeugung von jährlichem konditioniertem LILW pro Reaktor variieren zwischen den begutachteten Ländern und sind wiederum abhängig von vielen Faktoren, wie z.B. der Reaktortechnologie und den Konditionierungsverfahren. Deutschland z.B. schätzt 45 m³ von konditioniertem LILW pro Jahr für die Leichtwasserreaktoren (LWR, einschließlich PWR und BWR)³², während Frankreich 78 m³ pro Reaktor für die PWR schätzt.³³

ABGEBRANNT BRENNELEMENTE

Die IAEO schätzt, dass durch den Betrieb eines 1 GW Leichtwasserreaktors ungefähr 30 bis 50 Tonnen (Schwermetall) abgebrannte Brennelemente jährlich anfallen.³⁴ Wenn man diese Schätzung auf die weltweit installierte Betriebsleistung von 363 GW anwendet, würde dies zu einer jährlichen Produktion von etwa 11.000 bis 18.000 Tonnen SNF führen. Bis zum Jahre 2013 sind weltweit ungefähr 370.000 Tonnen angefallen, seit der erste Reaktor ans Netz gegangen ist, wovon ungefähr ein Drittel (120.300 Tonnen) wiederaufgearbeitet wurden.³⁵ Um eine ungefähre Einschätzung des Gewichts und des Volumens der gelagerten abgebrannten Brennelemente zu erhalten, kann man das Verhältnis von Konversion von Masse (tHM) zu Volumen (m³) von 2,5 für den Typ LWR anwenden.³⁶

Die IAEO schätzt, dass eine Wiederaufarbeitung dieser 30 bis 50 Tonnen SNF zu 15 m³ verglastem HLW führen würde.³⁷ Diese konservative Schätzung beinhaltet natürlich nicht die riesigen Mengen von wiederaufgearbeitetem Uran, Plutonium, mittelradioaktiven Abfällen und abgebrannten Mischoxid-Brennelementen (MOX), die extensive zusätzliche Zeiträume für die Zwischenlagerung benötigen.³⁸ In Europa ist die Wiederaufarbeitung in einigen Ländern (Frankreich, Niederlande, Russland) noch Teil des Management-Konzepts für radioaktive Abfälle, während die meisten Länder (Belgien, Bulgarien, Deutschland, Ungarn, Schweden, Schweiz und erst kürzlich Großbritannien) diese in erster Linie aus wirtschaftlichen Gründen ausgesetzt oder gestoppt haben. Das letzte europäische Land, welches Interesse an einer Wiederaufarbeitung gezeigt hat, ist die Ukraine, die einen Vertrag über eine Machbarkeitsstudie mit der französischen Firma Orano (früher Areva) geschlossen hat. Die Initiative ist Teil der Bemühungen der Ukraine, deren nukleare Brennstoffkette zu diversifizieren. Ein zusätzliches Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente ist im Bau, und das Land kooperiert mit Westinghouse auf dem Gebiet der Brennstoffversorgung.³⁹

ABFÄLLE AUS DER STILLLEGUNG

Sobald ein Atomkraftwerk stillgelegt wird, müssen die abgebrannte Brennelemente entfernt und die Kühlsysteme und die Moderatoren entleert werden. Der Prozess der Entfernung der Brennelemente

³² Deutsche Bundesregierung 2018, Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungs-konferenz im Mai 2018, erstellt innerhalb des Rahmens des Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle.

³³ Wolfgang Neumann, „Nuclear Waste Management in the European Union: Growing volumes and no solution“, intac, Auftrag der Grünen/EFA im Europäischen Parlament, Oktober 2010, https://www.sortirdunucleaire.org/IMG/pdf/thegreens-efa-2010-nuclear_waste_management_in_the_european_union-growing_volumes_and_no_solution.pdf, Stand 12. Juni 2019.

³⁴ IAEO, „Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials“, TECDOC-1591, Juni 2007.

³⁵ IAEO, „Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management“, IAEA Nuclear Energy Series, No. NW-T-1.14, 2018.

³⁶ Oak Ridge National Laboratory, „Integrated Data Base Report—1996: U.S. Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections, and Characteristics“, US-Energieministerium (DOE), DOEIRW-0006, Rev. 13, Dezember 1997.

³⁷ IAEO, „Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles“, Vorbereitende Studie, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.7, 2019.

³⁸ Über 100 Jahre verglichen mit Uranbrennstoffen oder sehr viel größeren Mengen in den Endlagern (ungefähr Faktor 3). Eine detaillierte Erörterung vergleichbarer Mengen findet sich bei: Mycle Schneider und Yves Marignac, „Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France“, IPFM, April 2008.

³⁹ IPFM, „Ukraine to explore reprocessing its spent fuel in France“, Internationaler Ausschuss zu Spaltmaterialien, 3. Mai 2018, http://fissilematerials.org/blog/2018/05/ukraine_to_explore_reproc.html, Stand 12. Juni 2019.

und des Rückbaus eines Atomkraftwerks wird als Stilllegung bezeichnet.⁴⁰ Die IAEO schätzt die Masse (eher als das Volumen) der Abfälle aus der Stilllegung wie folgt: Man kann davon ausgehen, dass ein Leichtwasser-Reaktor (LWR) mit 1 GW 5.000 bis 6.000 Tonnen LILW und 1.000 Tonnen langlebigen LILW und HLW produziert.⁴¹ Diese Schätzung muss mit Vorsicht betrachtet werden, weil bisher nur ein Reaktor mit einer Leistung von 1 GW weltweit vollständig stillgelegt worden ist, wobei dieser Reaktor (Trojan in den USA) allerdings nur 17 Jahre lang in Betrieb war. Bis zum Jahre 2018 wurden weltweit nur 19 (kleinere) Atomkraftwerke oder ungefähr 6 GW vollständig stillgelegt. (siehe Tabelle 1).⁴² Ähnlich den Betriebsabfällen ist die Menge der Abfälle aus der Stilllegung von verschiedenen Faktoren abhängig, wie dem Freigabewert von Abfall, der Stilllegungsstrategie (sofortiger Rückbau oder langfristiger Einschluss mit späterem Rückbau), der Betriebszeit und der spezifischen Reaktortechnologie. Der in den anfänglichen Schritten der Stilllegung anfallende Abfall hat dieselben Eigenschaften wie Betriebsabfall und kann unter Verwendung desselben Ansatzes mit einer Ausnahme charakterisiert werden: dieser fällt in viel größeren Mengen innerhalb eines kürzeren Zeitraums an.⁴³

TABELLE 1: Vollständig stillgelegte Reaktoren weltweit – Stand 31. Mai 2018

Land	Reaktor	Leistung in MW	Ende der Stilllegung in	Betriebsjahre
DEUTSCHLAND	5	1.017 (gesamt)		
	Niederaichbach	100	1995	1
	HDR Großwelzheim	25	1998	2
	VAK Kahl	15	2010	24
	Würgassen	640	2014	23
	Gundremmingen-A	237	2016	11
JAPAN	1	12 (gesamt)		
	JPDR	12	2002	13
USA	13	4.922 (gesamt)		
	Elk River	22	1974	5
	Shippingport	60	1989	25
	Pathfinder	59	1993	1
	Shoreham	809	1995	0
	Fort St. Vrain	330	1997	13
	Maine Yankee	860	2005	24
	Saxton	3	2005	5
	Trojan	1,095	2005	17
	Yankee NPS	167	2006	31
	Big Rock Point	67	2006	35
	Haddam Neck	560	2007	29
	Rancho Seco-1	873	2009	15
	CVTR	17	2009	4
INSGESAMT		5.951		

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Schneider et al. (2018).

Anmerkungen: HDR = Heißdampfreaktor (BWR, Boiling Water Reactor); VAK = Versuchsatomkraftwerk; JPDR = Japan Power Demonstration Reactor; NPS = Nuclear Power Station (Atomkraftwerk); CVTR = Carolinas-Virginia Tube Reactor.

⁴⁰ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

⁴¹ IAEO, „Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials“, TECDOC-1591, 2007, S.16.

⁴² Mycle Schneider, Antony Froggatt, et al., „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

⁴³ IAEO, „Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials“, TECDOC-1591, 2007.

GESCHÄTZTE ABFALLMENGEN ENTLANG DER LIEFERKETTE

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die geschätzten Mengen von nicht-konditionierten Abfällen pro Land, mit Ausnahme der während des Uranabbaus, der Aufbereitung und der Konversion von Uranbrennstoff anfallenden Abfällen. Die momentan (per 2019) in Betrieb befindlichen 142 europäischen Atomkraftwerke (außer Russland und Slowakei) mit einer ungefähren Leistung von 149 GW, zusammen mit einem Durchschnittsalter der Reaktoren (je Reaktortechnologie) sowie der 90 abgeschalteten Atomkraftwerken oder 36 GW, zusammen mit der durchschnittlichen Betriebszeit der Reaktoren (je Reaktortechnologie), werden in Betracht gezogen. Diese Schätzung ist aufgrund der Vereinfachung ungenau, weil diese annimmt, dass die Produktion von Abfall pro GW über die Jahre hinweg konstant gewesen ist. Darüber hinaus sind die Uranabfälle in dieser Schätzung nicht enthalten, weil der größte Teil des Urans importiert wurde und deshalb große Mengen an Abfällen außerhalb von Europa anfallen.

- **BETRIEB:** Die Anfallrate für Betriebsabfälle basiert auf den vorstehend genannten Anfallraten von nicht-konditioniertem LILW pro 1 GW Atomkraftwerk je Reaktortechnologie. Diese Schätzung führt zu 2.916.000 m³ LILW (1.560.000 m³ aus in Betrieb befindlichen Reaktoren und 1.356.000 m³ aus abgeschalteten Reaktoren). Zusätzlich werden 1.378.000 m³ Betriebsabfälle bis zum Abschalten der Reaktoren erwartet. Dieses summiert sich auf 4.294.000 m³ LILW aus dem Betrieb der Anlagen.
- **ABGEBRANNTE BRENNNELEMENTE:** für die Erzeugung von abgebrannten Brennelementen wird eine Schätzung von 40 Tonnen SNF pro 1 GW Reaktor pro Jahr angenommen. Dies führt zu einem geschätzten momentanen Bestand von 226.000 Tonnen SNF in der Kategorie HLW (196.000 Tonnen aus den in Betrieb befindlichen und 30.000 Tonnen aus den abgeschalteten Reaktoren). Darüber hinaus werden 123.000 Tonnen SNF bis zum Abschalten der Reaktoren erwartet, wodurch sich eine Gesamtmenge von ca. 350.000 Tonnen ergibt. Bei Anwendung des DOE-Konversionsverhältnisses von Masse zu Volumen für LWR beträgt die momentane Menge 566.000 m³. Bis zum Abschalten wird sich die Gesamtmenge auf 874.000 m³ an abgebrannten Brennelementen erhöhen.
- **STILLEGUNG:** Unter Anwendung einer konservativen Annahme⁴⁴ von 6.000 m³/Reaktor Anfallrate durch die Stilllegung fallen zusätzlich 1.400.000 m³ an LILW aus der Stilllegung an.

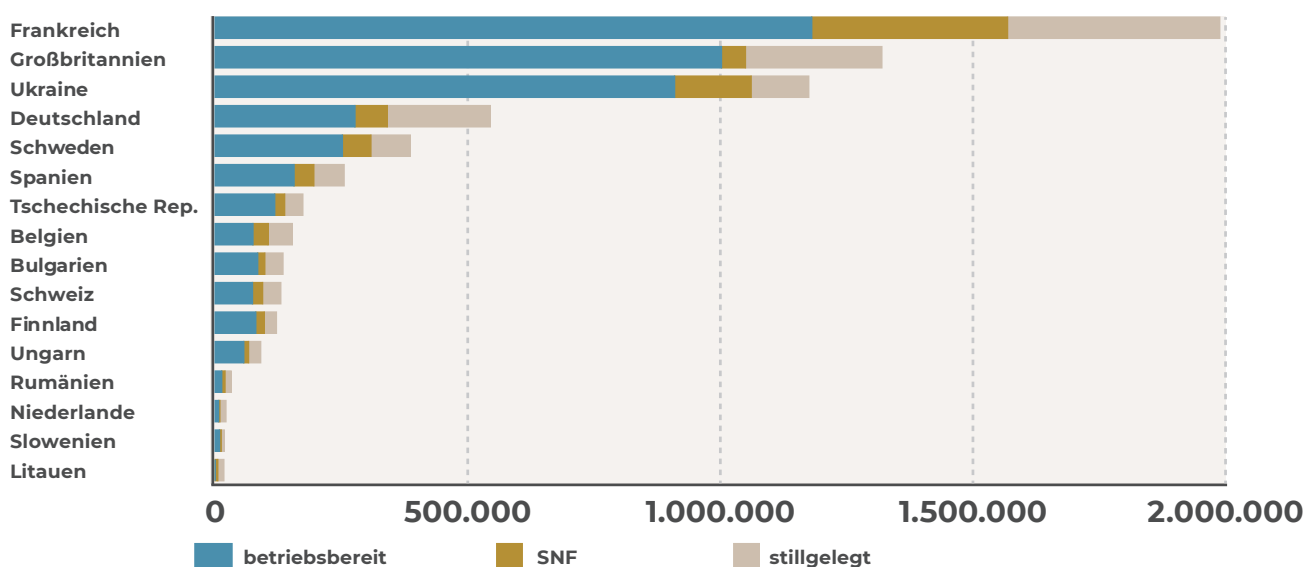
Es wird geschätzt, dass die europäischen Atomreaktoren ungefähr 6,6 Millionen m³ radioaktive Abfälle über deren Lebensdauer hinweg produzieren. Wenn man diese radioaktiven Abfälle übereinander stapeln würde, würden diese ein Fußballfeld mit einer Höhe von 919 Metern ausfüllen, 90 Meter höher als das höchste Gebäude der Welt, das Burj Khalifa in Dubai.

Auf der Grundlage dieser Annahmen beträgt die geschätzte Gesamtmenge an Betriebsabfällen und den abgebrannten Brennelementen, die durch die Atomkraftwerke in Europa (mit Ausnahme von Russland und der Slowakei) über die gesamte Lebensdauer produziert wird, 5,2 Millionen m³. Nachdem alle europäischen Reaktoren stillgelegt worden sind, beträgt die geschätzte Abfallmenge ungefähr 6,6 Millionen m³

⁴⁴ Dieser Wert ist abhängig von der angenommenen durchschnittlichen Dichte des Abfalls und der Konditionierungs- und Verpackungsverfahren. Siehe IAEO, 2007.

radioaktive Abfälle über deren Lebensdauer hinweg. Mit einem Anteil von 30 Prozent würde Frankreich Europas größter Produzent von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen sein, gefolgt von Großbritannien (20 Prozent), der Ukraine (18 Prozent) und Deutschland (8 Prozent). 75 Prozent der europäischen radioaktiven Abfälle fällt in diesen vier Ländern an. Wenn man diese radioaktiven Abfälle übereinander stapeln würde, würden die gesamten europäischen radioaktiven Abfälle ein Fußballfeld mit einer Höhe von 919 Metern ausfüllen, 90 Meter höher als das höchste Gebäude der Welt, das Burj Khalifa in Dubai. Alle diese radioaktiven Abfälle müssen konditioniert und endgelagert werden.

ABBILDUNG 2: Geschätzte Mengen an radioaktiven Abfällen aus dem Betrieb und der Stilllegung der europäischen Reaktoren (im Betrieb und abgeschaltet), und aus dem Management von abgebrannten Brennelementen in m³ – Stand 31. Dezember 2018



Quelle: Eigene Zusammenstellung und Schätzung auf der Grundlage der Annahmen der Erzeugungsrate: IAEA (2007), US DOE (1997).

3.3 GEMÄSS DES GEMEINSAMEN ÜBEREINKOMMEN BERICHTETE ABFALLMENGEN

Für diesen Abschnitt wurden die Daten für die verschiedenen europäischen einzelstaatlichen Bestände aus den offiziellen Dokumenten entnommen, die von den betreffenden Regierungen, Aufsichtsbehörden oder anderen zuständigen Behörden gemäß des gemeinsamen Übereinkommens veröffentlicht wurden.

URANABBAU UND BRENNSTOFFHERSTELLUNG

Die EU importiert das meiste Uran. Frankreich hat in der Vergangenheit Uranerz abgebaut. Offiziell sind in dem früheren Uranbergbau 50 Millionen Tonnen Tailings angefallen, verteilt auf mehr als 17 Lagerstätten an den früheren Bergwerken.⁴⁵ Unabhängige Experten schätzen, dass die Menge weitaus größer ist, weil die offiziellen nationalen Bestände einige „vergessene Abfälle“ aufweisen, wie dies in der Kopfzeile von *Le Monde* ausgedrückt wird.⁴⁶

Die frühere Deutsche Demokratische Republik (DDR) hat sehr viel größere Mengen Uranerz abgebaut als Frankreich; der Abbau wurde 1990 nach der deutschen Wiedervereinigung gestoppt. Ungefähr

⁴⁵ Französische Regierung, „France–Sixth National Report on Compliance with the Joint Conventions Obligations“, erstellt im Rahmen des Gemeinsames Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, 2. Oktober 2017.

⁴⁶ *Le Monde*, „Le lent poison des déchets radioactifs ‘oubliés’“, 11. Juni 2019.

231.000 Tonnen Uran wurden in der DDR abgebaut, wodurch das Land zu der Zeit zum weltweit viertgrößten Uranproduzenten wurde. Heutzutage umfassen die Hinterlassenschaften des Bergbaus 32 km² an Betriebsbereich, 48 Abraumhalden mit einem Volumen von 311 Millionen m³ und vier Absetzteiche mit 160 Millionen m³ radioaktiven Schlämmen.^{47, 48} Wie in den meisten Fällen, bestand die Sanierung nur in der Einrichtung einer stabilen Abdeckung über dem Abraum.

Heutzutage ist die Russische Föderation einer der größten Uranproduzenten der Welt, wobei die Bergbauarbeiten die hauptsächliche Quelle für den Anfall von schwachradioaktiven Feststoffabfällen darstellen. Alleine im Jahre 2016 hat das russische Bergbauunternehmen PIMCU (Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union) ungefähr 700.000 m³ Bergbaurückstände produziert, die unter die Kategorie LILW fallen. Allerdings enthält der russische Bericht gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens kein angesammeltes Datenmaterial über Abfälle aus Bergbauaktivitäten.⁴⁹

Der gefährlichste radioaktive Abfall in kommerziellen Anreicherungsanlagen und in den Anlagen mit radioaktivem Abfall befindet sich in Capenhurst (GB), Almelo (Niederlande), Gronau (Deutschland) und Tricastin (Frankreich). In der Vergangenheit haben die französischen, deutschen und niederländischen Betreibergesellschaften mehr als 10.000 Tonnen der Nebenprodukte der Anreicherung und von abgereichertem Uranhexafluorid (UF₆) nach Russland transportiert, wo große Mengen verbleiben.⁵⁰ Jetzt müssen die Unternehmen, die die Anreicherungsanlagen in der EU betreiben, das abgereicherte UF₆ behalten. In Deutschland beträgt die erwartete Menge an verpackten radioaktiven Abfällen aus der Urananreicherung bis zu 100.000 m³ abgereichertes Uran.⁵¹

SCHWACH- UND MITTEL-RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Die unterschiedlichen Ansätze zur Erfassung der nationalen Bestände machen es schwierig, die Menge der in der Vergangenheit entstandenen radioaktiven Abfälle in den Ländern zu vergleichen, weil die Betriebsabfälle in unterschiedlichen physikalischen Formen gelagert werden (z.B. flüssig, fest und vorgepresst) oder weil die Abfälle bereits konditioniert, kompaktiert oder entsorgt worden sind. In einigen Fällen werden die Abfälle in unterschiedlichen Kategorien, wie LLW und ILW oder LILW, zusammengefasst, oder diese Abfälle existieren in anderen unterschiedlichen Formen. Russland übermittelt eine Schätzung von ungefähr 556 Millionen m³ radioaktiven Abfällen mit wenigen Informationen über deren Ursprung (große Mengen entstammen den Bergbauaktivitäten), die Abfallklassifizierung und den Zustand. Der markanteste Fall ist die Slowakei, wo die Informationen über die Arten der radioaktiven Abfälle, wie „in Stücken“, „Fässern“ oder „Paletten“, keinerlei Klassifizierung der Mengen gestattet (keines dieser Länder ist in Table 2 enthalten).

⁴⁷ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle—Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungs-konferenz im Mai 2018“, 30 August 2017.

⁴⁸ Die deutschen Vorschriften betrachten Haldenmaterialien, Abraum sowie sonstige Abfälle an den kontaminierten Standorten des Uranerzabbaus generell nicht als radioaktive Abfälle und deshalb existiert ein zusätzlicher Bericht zu dem Bericht, der gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens veröffentlicht wird.

⁴⁹ Regierung der Russischen Föderation, „The Fifth National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management“, erstellt für die sechste Überprüfungs-konferenz gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens, 2017.

⁵⁰ Wolfgang Neumann, „Nuclear Waste Management in the European Union: Growing volumes and no solution“, intac, Auftrag der Grünen/EFA im EU-Parlament, Oktober 2010.

⁵¹ NEA, „Radioactive Waste Management Programmes in OECD/NEA Member Countries—Germany“, Nuclear Energy Agency, OECD, 2016, https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/germany_profile.pdf, Stand 12. Juni 2019.

Tabelle 2 zeigt einen Überblick über die berichteten Mengen an LILW in Zwischen- und Endlagern. Da bei den verschiedenen Nationalen Berichten gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens oftmals die detaillierten Einzelheiten über den Ursprung der Abfälle fehlen, ist es nicht immer klar, ob die aufgeführten LILW-Mengen nur aus dem Betrieb der Atomkraftwerke und der Wiederaufarbeitung stammen oder ob diese die Abfälle aus der Stilllegung beinhalten.

Tabelle 2: Schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Europe in Zwischenlagern und Endlagern (gerundete Zahlen) – Stand 31. Dezember 2016

Land	LILW in Zwischenlager (m ³)	LILW in Endlagern (m ³)	Gesamtmenge an LILW (m ³)
BELGIEN	23.200	Keine Anlage in Betrieb.	23.200
BULGARIEN	11.900	Keine Anlage in Betrieb.	11.900
DEUTSCHLAND	45.200	84.100	129.300
FINNLAND	1.970	7.600	9.600
FRANKREICH	180.000	853.000	1.033.000
GROßBRITANNIEN	130.000	942.000	1.072.000
LITAUEN	44.000	Keine Anlage in Betrieb.	44.000
NIEDERLANDE	11.100	Keine Anlage in Betrieb.	11.100
RUMÄNIEN	1.000	Keine Anlage in Betrieb.	1.000
SCHWEDEN	13.800	39.000	52.800
SCHWEIZ	8.400	Keine Anlage in Betrieb.	8.400
SLOWENIEN	3.400	Keine Anlage in Betrieb.	3.400
SPANIEN	6.700	32.200	38.900
TSCHECHISCHE REP.	1.750	11.500	13.250
UKRAINE*	59.400	Keine Anlage in Betrieb.	59.400
UNGARN	10.600	876	11.500
INSGESAMT	552.400	1.970.000	2.522.000

Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage der Berichte gemäß des Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle und ONDRAF/NIRAS (2017).

Anmerkung: *Ohne (zwischen- und endgelagerte) Abfälle aus der Tschernobyl-Zone.

Durch Hinzufügen der Daten der Nationalen Berichte gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens ergeben sich mehr als 550.000 m³ LILW, die sich zur Zeit in Zwischenlagern über Europa hinweg befinden (selbst ohne Slowakei und Russland) und die auf eine Endlagerungslösung warten. Einschließlich der endgelagerten radioaktive Abfälle beträgt die Gesamtmenge von LILW, die in Europa angefallen ist, insgesamt 2,5 Millionen m³ zwischengelagerter und endgelagerter Abfälle.⁵² Diese Zahl ist dicht an der Menge von 3 Millionen m³ nicht-konditionierter Betriebsabfälle auf der Grundlage der IAEO-Schätzungen (selbst ohne die Slowakei und Russland). Obwohl es schwierig ist, diese Zahlen aufgrund des Fehlens

⁵² Diese Menge beinhaltet nicht die großen Mengen an sehr schwachradioaktiven Abfällen (VLLW), die im Laufe des Betriebs angefallen sind. Zum Beispiel lagern alleine in Frankreich zusätzlich 185.000 m³ VLLW in Zwischenlagern und 352.000 m³ wurden endgelagert. Für die Mehrheit der berücksichtigten Länder wurden keine Daten zu den VLLW-Mengen veröffentlicht.

von detaillierten Informationen über die gelagerten Abfälle zu vergleichen, weil nicht bekannt ist, ob diese Abfälle konditioniert sind, oder nicht.

Bis zum heutigen Tage haben weniger als die Hälfte der betrachteten Länder Endlager installiert, meistens für LLW und nicht ILW: Großbritannien, Frankreich, Spanien, Ungarn, Finnland, Tschechische Republik, Schweden und Deutschland. Aber diese Länder haben zusammen bis zu annähernd 2 Millionen m³ Betriebsabfälle endgelagert. Großbritannien hat alleine bereits 1 Millionen m³ LLW endgelagert, das meiste hiervon in dem oberflächennahen Endlager Drigg.⁵³ Die beiden größten Atomstaaten in der EU, Frankreich und Großbritannien, haben jeweils fast doppelt so viel LILW in Endlagern gelagert, wie momentan in der EU in Zwischenlagern existiert. Nichtsdestoweniger ist dies mehr als zwei Drittel der momentan in Zwischenlagern und auf ein Endlager wartenden LILW-Abfälle.

In Deutschland wurde der radioaktive Abfall in zwei tiefegeologischen Endlagern verbracht. Allerdings muss der in dem Bergwerk Assel II in Niedersachsen zwischen 1967 und 1978 gelagerte radioaktive Abfall (ungefähr 47.000 m³ LILW in fast 126.000 Fässern) zurückgeholt werden, weil es kontinuierliche Zuflüsse von Grundwasser aus dem Deckgebirge in das Bergwerk gibt. Bis jetzt existiert für die bis zu 220.000 m³ Abfälle aus einer Mischung aus radioaktiven Abfällen und Salz kein Entsorgungskonzept.⁵⁴ Niemals zuvor wurden radioaktive Abfälle aus einem tiefegeologischen Endlager zurückgeholt. Dies ist das erste Mal in der Geschichte. Hierbei existieren große technologische, logistische und finanzielle Herausforderungen. Darüber hinaus fällt bei der Rückholung eine neue Abfallart an: entsorgter Abfall, der nach der Rückholung neu konditioniert, gelagert und letztendlich endgelagert werden muss (die Mengen an entsorgten Abfällen im Falle der Asse II haben sich mittlerweile verfünffacht, es handelt sich jetzt um eine Mischung aus Salz und radioaktiven Abfällen).

Auch nachdem die Reaktoren abgeschaltet und anschließend stillgelegt worden sind, werden große Mengen an LILW anfallen. Bis zum Jahre 2018 wurden nur 19 Atomkraftwerke vollständig stillgelegt. Von diese befinden sich nur 5 in Europa, nämlich in Deutschland.⁵⁵ Obwohl Stilllegungsarbeiten in Europa durchgeführt werden, sind Berichte über die Mengen von radioaktiven Abfällen aus der Stilllegung schwer zu finden. Der deutsche Bericht gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens führt keine genauen Abfallmengen auf, die während der Stilllegung angefallen sind, sondern es gibt nur eine Schätzung für die Abfallrate: 5000 m³ konditionierter LILW pro Reaktor.⁵⁶ Allerdings fallen durch die Stilllegung auch Abfälle an, die dieselbe Behandlung wie HLW erfordern. Die Stilllegungsarbeiten an den Atomkraftwerken José Cabrera und Vandellos in Spanien, zum Beispiel, haben 185 m³ „Spezielle radioaktive Abfälle“ produziert, die zusammen mit HLW in ein Endlager verbracht werden müssen, und zwar hauptsächlich durch das Zerschneiden der inneren Komponenten der Reaktordruckbehälter. Dieser Abfall wird momentan in vier Trockenlagerbehältern vor Ort gelagert.⁵⁷ Ungarn schätzt, dass bei der Stilllegung der vier Einheiten des Atomkraftwerks Paks insgesamt 26.700 m³ LILW (6.700 m³ pro Reaktor) und 300 m³ HLW anfallen.⁵⁸

⁵³ Wolfgang Neumann, „Nuclear Waste Management in the European Union: Growing volumes and no solution“, intac, Oktober 2010.

⁵⁴ Ibidem.

⁵⁵ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

⁵⁶ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle—Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungs-konferenz im Mai 2018“, 2017, S. 86.

⁵⁷ Spanische Regierung, „Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management—Sixth Spanish National Report“, Oktober 2017.

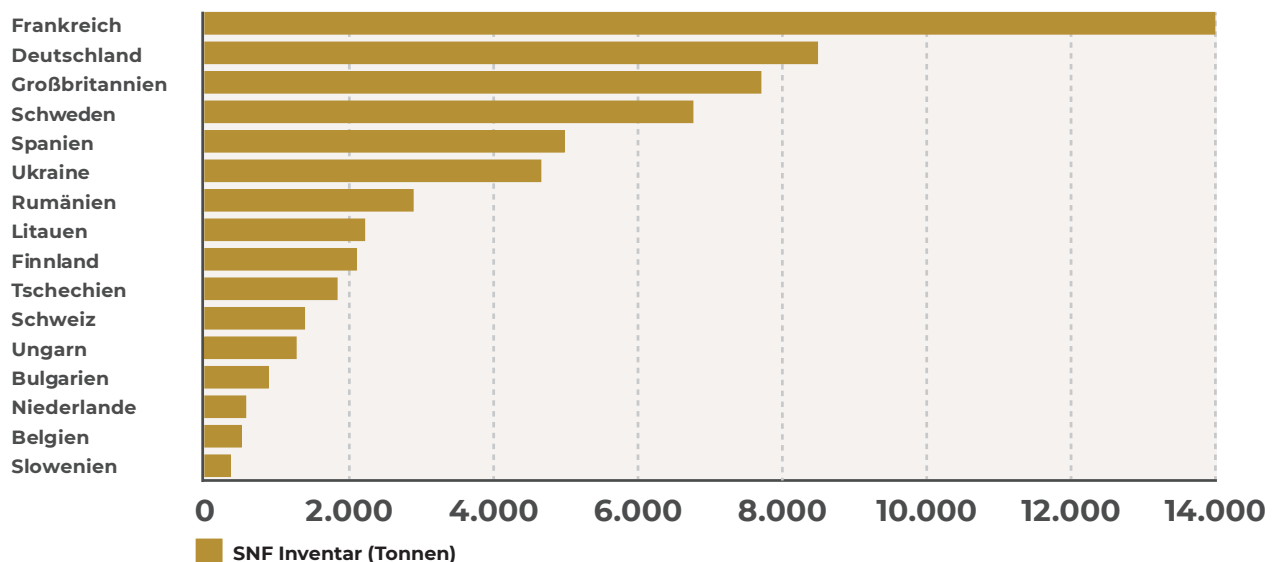
⁵⁸ Ungarische Regierung, „National Report—Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“, 2017.

Zusätzlich zu der Herausforderung, die größten Reaktorflotten in Europa stillzulegen, sehen sich drei Länder (Großbritannien, Frankreich und Russland) zusätzlichen Herausforderungen gegenüber, weil deren atomares Vermächtnis seltene Reaktortypen beinhaltet: gasgekühlte Reaktoren (GCR, gas-cooled reactors) in Frankreich und Großbritannien und der noch in Russland und in der Ukraine in Betrieb befindliche sowjetische Reaktortyp RBMK. Diese Reaktorkerne wurden unter Verwendung von Tausenden Tonnen von Graphitblöcken konstruiert. Ein typischer Magnox-Reaktor in Großbritannien kann ungefähr 3.000 Tonnen des hoch-bestrahlten Graphits enthalten, welches als ILW klassifiziert ist und aufgrund der langlebigen Isotope abgeschirmt und wahrscheinlich in tiefegeologischen Endlagern gelagert werden muss. Auch in Frankreich wird der größte Teil der schwachradioaktiven, langlebigen radioaktiven Abfälle (LL-LLW) Graphitabfall aus den gasgekühlten Reaktoren sein, der während der Stilllegung der GCR anfallen wird. Es gibt keinen Entsorgungspfad – noch nicht einmal einen theoretischen – für den Graphitabfall.⁵⁹

ABGEBRANNT BRENNELEMENTE UND HOCHRADIOAKTIVE ABFÄLLE

In den meisten Fällen werden die nationalen Bestände an abgebrannten Brennelementen (SNF) in Tonnen Schwermetall (tHM oder Mg HM) oder in der Anzahl der Brennelemente (FA, fuel assemblies) angegeben. Momentan sind ungefähr 60.500 Tonnen an abgebrannten Brennelementen in unterschiedlichen Formen in Europa gelagert (ausgenommen von Russland und der Slowakei), wobei Frankreich, Deutschland und Großbritannien für ungefähr 50 Prozent verantwortlich sind. Innerhalb der EU sind ungefähr 57.000 Tonnen gelagert; auf Frankreich entfallen 25 Prozent des momentanen Bestands an SNF, gefolgt von Deutschland (15 Prozent) und Großbritannien (14 Prozent). Auf diese drei Länder entfallen mehr als die Hälfte des SNF-Bestands der EU.

Abbildung 3: Abgebrannte Brennelemente in Zwischenlagern in Europa
(mit Ausnahme von Russland und der Slowakei) in Tonnen – Stand 31. Dezember 2016



Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage der gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle veröffentlichten Berichte.

Anmerkungen: Für Belgien, wurden Angaben aus 2011 benutzt; für die Niederlande aus 2010; und für die Ukraine, aus 2008.

⁵⁹ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al. „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit., S. 144.

Russland und die Slowakei sind in Abbildung 3 und Tabelle 3 nicht enthalten, weil die veröffentlichte LILW-Kategorie nicht zu Vergleichszwecken benutzt werden kann (siehe oben). Nichtsdestoweniger berichten die beiden Länder über die Mengen an gelagertem SNF: in Russland sind ungefähr 22.388 Tonnen SNF (wobei 92 Prozent hiervon in Nasslagern gelagert sind) und in der Slowakei sind 13.102 Brennelemente oder 1.559 Tonnen SNF gelagert.

Abgebrannte Brennelemente werden generell in Reaktorabklingbecken oder in Zwischenlagern gelagert. Letztere können entweder Trockenlagerung in Behältern oder Nasslagerung in Abklingbecken bedeuten. Bezüglich des Risikos für Mensch und Umwelt ist die Nasslagerung gefährlicher. Tabelle 3 gibt daher einen Überblick über die Menge an SNF, die noch in einem Nasslager gelagert ist. Dieses Nasslager befindet sich entweder innerhalb des Reaktorgebäudes oder in einer separaten Lagereinrichtung. Im Jahre 2016 befanden sich 81 Prozent oder ungefähr 49.000 Tonnen des europäischen SNF (ausgenommen von Russland und der Slowakei) noch in Nasslagern. Auf Frankreich und Großbritannien entfallen 40 Prozent der momentanen EU-Bestände, und diese Länder haben keinerlei SNF in die Trockenlagerung transferiert.

Obwohl in Großbritannien an dem Atomkraftwerk Sizewell eine Trockenlagereinrichtung gebaut worden ist, werden in den Berichten aus Großbritannien keine Daten in Bezug auf Trockenlagerung übermittelt. Die geschätzte Gesamtmenge an abgebrannten Brennelementen, die sich aus dem Betrieb von Sizewell B von 40 Jahren ergibt, beträgt etwas mehr als 1.000 Tonnen. EDF Energy beabsichtigt, alle abgebrannten Brennelemente bis zum Jahre 2040 aus der Nass- in die Trockenlagerung zu überführen. Nur wenige europäische Länder haben die Hauptmenge der abgebrannten Brennelemente in eine Trockenlagerung überführt. Ungarn (83 Prozent) und die Tschechische Republik (64 Prozent) haben die höchsten Anteile an Trockenlagerung. Kein europäisches Land hat bis jetzt eine Endlagerstätte für SNF gebaut. Mit der fortgesetzten Produktion von SNF verringert sich die verbleibende Lagerkapazität. Zum Beispiel hat die Lagerkapazität für SNF in Finnland bereits 93 Prozent Ausnutzung erreicht und die dezentrale Lagereinrichtung CLAB (Centralt mellanlager för använt kärnbränsle) in Schweden ist zu 80 Prozent ausgenutzt.

Tabelle 3: Berichtete Bestände an abgebrannten Brennelementen (SNF) und Abfallmenge in Nasslagern in Europa – Stand 31. Dezember 2016

Land	SNF Inventar [Tonnen]	Brennelemente*	Nasslager [Tonnen]	SNF in Nasslagern [%]
BELGIEN	501**	4173	237	47 %
BULGARIEN	876	4.383	788	90 %
DEUTSCHLAND	8.485	N.Z.	3.609	43 %
FINNLAND	2.095	13.887	2.095	100 %
FRANKREICH	13.990	N.Z.	13.990	100 %
GROßBRITANNIEN	7.700	N.Z.	7.700	100 %
LITAUEN	2.210	19.731	1.417	64 %
NIEDERLANDE	80***	266	80	100 %
RUMÄNIEN	2.867	151.686	1.297	45 %
SCHWEDEN	6.758	34.204	6.758	100 %
SCHWEIZ	1.377	6.474	831	60 %
SLOWENIEN	350	884	350	100 %
SPANIEN	4.975	15.082	4.400	91 %
TSCHECHISCHE REP.	1.828	11.619	654	36 %
UKRAINE	4.651****	27.325	4.081	94 %
UNGARN	1.261	10.507	216	17 %
INSGESAMT	ca. 64.226		ca. 49.000	81 %

Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage der Berichte gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle.

Anmerkungen: * Die Berechnungen der SNF-Bestände variieren im Hinblick auf die Annahmen des Gewichts pro Brennelement: Belgien und Ungarn unterstellen 120 kg pro Brennelement; Litauen 112 kg, Slowakei 119 kg, und Rumänien 18,1 kg (Rumänien führt Brennelemente in Einheiten von CANDU-Gebinden auf).

** Angaben aus 2011. Die aktuellen Daten erlauben keine genaue Aufschlüsselung in Nass- und Trockenlagerung (Belgien gibt aktuell an, dass 1.102 t in den Abklingbecken (Nasslager) der Reaktoren Doel und Tihange lagern, weitere 2.326 t sind in Zwischenlagern an den Reaktorstandorten gelagert, wobei das Zwischenlager Tihange ein Nasslager und Doel ein Trockenlager ist).

*** Angaben aus 2010 (die Niederlande haben keine neueren Daten veröffentlicht).

**** Angaben aus 2008 (die Ukraine hat auch neuere Daten (Stand Juli 2017) veröffentlicht, diese waren den Autor*innen während des Verfassens nicht bekannt).

Die meisten Länder mussten ihren abgebrannten Brennelementen zur Wiederaufarbeitung ins Ausland, entweder nach Frankreich, nach Großbritannien oder Russland schicken (nur wenige zentraleuropäischen Länder machen dies weiterhin). Verglaste Abfälle (überwiegend HLW) wird in die Ursprungsländer zurückgeschickt. Mit der Schließung der THORP-Anlage in Großbritannien⁶⁰ im Jahre 2018 bleibt La Hague in Frankreich die letzte verbliebene kommerzielle Wiederaufarbeitungsanlage in Westeuropa. Nach der Beendigung der Wiederaufarbeitung wird in der THORP-Anlage weiterhin zwischen 5.500 und 6.000 Tonnen Kernbrennstoff gelagert.⁶¹

Zentral- und osteuropäische Länder haben ihren SNF-Abfall in die Russische Föderation zur Wiederaufarbeitung geschickt. Bulgarien hat z.B. langfristige kommerzielle Verträge für Wiederaufarbeitungsdienstleistungen für SNF mit Russland, aber hat alle SNF-Transporte im Jahre 2014 gestoppt. Nichtsdestoweniger wird sich die Option für zukünftige Exporte von SNF offengehalten.⁶² Der letzte Bericht aus Bulgarien gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens beinhaltet keinerlei Angaben zu den nach Bulgarien zurückgeschickten Abfallmengen.⁶³ In Ungarn wurde SNF aus der Anlage Paks (insgesamt 273 Tonnen) in die UdSSR/nach Russland zur Wiederaufarbeitung geschickt. In den 1990er Jahren allerdings hat Russland von Ungarn gefordert, die restlichen radioaktive Abfälle und andere, während der Aufarbeitung angefallene Nebenprodukte, zurückzunehmen.⁶⁴ Um sich dieses Abfalls anzunehmen, hat Ungarn im Jahre 1993 mit dem Bau eines zentralen Zwischenlagers begonnen. Nach dem Ende der Wiederaufarbeitung muss Ungarn 1.261 Tonnen SNF und 102 m³ HLW (per 31. Dezember 2016) lagern.

Ein weiteres Beispiel für ein Land, welches die Wiederaufarbeitung aufgegeben hat, ist Deutschland. Bis Mitte 2005 haben deutsche Versorgungsunternehmen ihren SNF nach Großbritannien oder Frankreich zur Wiederaufarbeitung geschickt. Das abgetrennte Plutonium wurde für MOX-Brennelemente verwendet und in deutschen Leichtwasserreaktoren wiedereingesetzt. In den deutschen Beständen betragen die wiederaufbereiteten Mengen an SNF ungefähr 42 Prozent oder 6.343 Tonnen.⁶⁵ Table 4 gibt einen Überblick über die Mengen an gelagerten radioaktiven Abfällen der Kategorien ILW und HLW aus der Wiederaufarbeitung. Mehr als die Hälfte der berichteten HLW-Menge kommt aus Frankreich. Die einzigen beiden Länder, die die Mengen an ILW im Zusammenhang mit Wiederaufarbeitung spezifizieren, sind Frankreich und Belgien.

⁶⁰ NDA und Sellafield Ltd, „End of reprocessing at Thorp signals new era for Sellafield“, 16. November 2018, <https://www.gov.uk/government/news/end-of-reprocessing-at-thorp-signals-new-era-for-sellafield>, Stand 12. Juni 2019,

⁶¹ ONR, „The United Kingdom’s Sixth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and Radioactive Waste Management“, Office for Nuclear Regulation, im Auftrag des Department for Business, Energy and Industrial Strategy, Oktober 2017.

⁶² In dem Zeitraum zwischen 2009 und 2014, wurden 2.400 VVER-440 Brennelemente (FA, Fuel Assemblies) nach Russland transportiert.

⁶³ Bulgarische Regierung, „Sixth National Report—On Fulfilment of the Obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“, 2017.

⁶⁴ NEA, „Radioactive Waste Management and Decommissioning in Hungary“, Nuclear Energy Agency/OECD, 2017, https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/hungary_report.pdf, Stand 12. Juni 2019.

⁶⁵ Der Bericht führt auf, dass 6.670 Tonnen SNF aus dem Kern entweder zur Wiederaufarbeitung (in La Hague, Sellafield, Karlsruhe und Belgien) entfernt wurden oder dauerhaft im Ausland verbleiben; siehe Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle – Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018“, 2017, S. 66.

Tabelle 4: Gelagerte hoch- und mittelradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung – Stand 31. Dezember 2016

Land	Aktive Wiederaufarbeitung	HLW [m ³]	ILW [m ³]
BELGIEN	Nein	285	3.132
BULGARIEN	Nein	n.a.	n.z.
DEUTSCHLAND	Nein	577	n.z.
FRANKREICH	Ja	3.740	42.800
GROßBRITANNIEN	Nein	1.960	n.z.
NIEDERLANDE	Ja*	91	n.z.
RUSSLAND	Ja	n.a.	n.z.
SCHWEIZ	Nein	114**	n.z.
SPANIEN	Nein	n.z.**	n.z.
UNGARN	Nein	102	n.z.

Quelle: Eigene Darstellung auf der Grundlage der Berichte gemäß dem Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle.

Anmerkungen: *in Frankreich. **zusätzlicher, in Frankreich gelagerter Abfall.

3.4 ZUSAMMENFASSUNG

Europäische Länder haben mehrere Millionen Kubikmeter radioaktive Abfälle produziert (diese Menge beinhaltet noch nicht einmal die Abfälle aus dem Uranabbau und der Uranverarbeitung). Bis zum Ende des Jahres 2016 waren Frankreich, Großbritannien und Deutschland die größten Produzenten von radioaktiven Abfällen entlang der Kernbrennstoffkette in Europa.

Über 60.000 Tonnen abgebrannten Brennelementen sind über Europa verteilt gelagert (ohne Russland und die Slowakei), wobei sich der größte Teil in Frankreich befindet. Innerhalb der EU entfallen auf Frankreich 25 Prozent der momentanen abgebrannten Brennelemente, gefolgt von Deutschland (15 Prozent) und Großbritannien (14 Prozent). Abgebrannte Brennelemente werden als hochradioaktiver Abfall betrachtet. Obwohl dieser nur in vergleichsweise geringen Mengen vorkommt, macht dieser den weitaus größten Teil der Radioaktivität aus. In Großbritannien macht der hochradioaktive Abfall z.B. weniger als 3 Prozent des Volumens der gesamten radioaktiven Abfälle aus, beträgt aber fast 97 Prozent des gesamten radioaktiven Inventars. Der größte Teil der abgebrannten Brennelemente wurde in Abklingbecken (sog. Nasslagerung) zur Reduzierung von Wärme und Radioaktivität transportiert. Gemäß den Zahlen von 2016 befinden sich 81 Prozent der abgebrannten Brennelemente in Europa in Nasslagern. Es wäre sicherer, die abgebrannten Brennelemente in eine Trockenlagerung in getrennten Lagern zu überführen.

Es ist geplant, einen großen Teil der gelagerten abgebrannten Brennelemente in Frankreich und in den Niederlanden wiederaufzuarbeiten. Die meisten anderen europäischen Atomstaaten (Belgien, Bulgarien, Deutschland, Ungarn, Schweden, Schweiz und erst kürzlich Großbritannien) haben die Wiederaufarbeitung auf unbestimmte Zeit verschoben oder beendet. Nicht alle Länder berichten über die Mengen an abgebrannten Brennelementen, die wiederaufgearbeitet worden sind. In den meisten Fällen wird in den Berichten nur von verglastem, hochradioaktivem Abfall aus der Wiederaufarbeitung gesprochen. Dasselbe trifft für die riesigen Mengen von wiederaufgearbeitetem Uran, Plutonium, mittelradioaktivem Abfall und

verbrauchte Mischoxid-Brennelemente (MOX) zu; diese radioaktiven Abfälle erfordern extensive zusätzliche Zwischenlagerungszeiträume. Ungefähr 2,5 Millionen m³ von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen sind in Europa angefallen. Hierbei handelt es sich teilweise um eine Schätzung, da diese Menge die radioaktiven Abfälle aus der Slowakei und aus Russland nicht beinhaltet. Ungefähr 20 Prozent dieser radioaktiven Abfälle (0,5 Millionen m³) ist über Europa verteilt zwischengelagert worden und muss noch in Endlager verbracht werden. Diese Menge erhöht sich ständig, wobei es nirgendwo einen vollständigen Entsorgungspfad gibt. Ungefähr 80 Prozent dieser Abfälle (annähernd 2 Millionen m³) sind endgelagert worden. Allerdings bedeutet dies nicht, dass diese Abfälle erfolgreich für die kommenden Jahrhunderte eliminiert worden sind. Das Endlager Asse II, zum Beispiel, in einem früheren Salzbergwerk in Deutschland leidet unter dem kontinuierlichen Eindringen von Grundwasser. Die 220.000 m³, eine Mischung aus radioaktiven Abfällen und Salz, müssen geborgen werden; dies ist eine komplexe und sehr kostspielige Aufgabe. Die Mengen betragen jetzt das Fünffache der ursprünglichen Menge an radioaktiven Abfällen aufgrund der Vermischung von Salz und radioaktiven Abfällen. Deshalb sollte man den Begriff Endlagerung mit Vorsicht verwenden.

Bei der Stilllegung der Atomanlagen werden zusätzlich sehr große Mengen an radioaktiven Abfällen anfallen. Ohne Einbeziehung der Anlagen der Brennstoffkette wird alleine die Stilllegung der europäischen Atomkraftwerke wahrscheinlich mindestens weitere 1,4 Millionen m³ produzieren. Dies ist eine konservative Schätzung, weil es nur sehr wenig Erfahrung auf dem Gebiet der Stilllegung gibt. Im Jahre 2018 befanden sich 142 Atomkraftwerke in Europa in Betrieb (ohne Russland und die Slowakei). Der fortlaufende Anfall von radioaktiven Abfällen und die zukünftige Stilllegung von Atomanlagen sind eine ständig wachsende Herausforderung, weil die Lagereinrichtungen in Europa langsam an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen, insbesondere für abgebrannte Brennelemente. Zum Beispiel hat die Lagerung von abgebrannten Brennelementen in Finnland fast 93 Prozent der Lagerkapazität erreicht. Die schwedische dezentrale Lagereinrichtung CLAB hat 80 Prozent ihrer Kapazität erreicht. Allerdings berichten nicht alle Länder über die erreichten Kapazitätsgrenzen der Lagerung, wodurch ein vollständiger Überblick unmöglich wird.

Es wird geschätzt, dass alle europäischen Atomkraftwerke über die gesamte Lebensdauer hinweg ungefähr 6,6 Millionen m³ radioaktive Abfälle produzieren werden (ohne Russland und die Slowakei). Wenn man diese Menge an einem Ort stapeln würde, würde ein Fußballfeld mit einer Höhe von 919 Metern entstehen; dies wäre 90 Meter höher als das höchste Gebäude der Welt, das Burj Khalifa in Dubai. Die Berechnung beinhaltet radioaktive Abfälle aus dem Betrieb, die abgebrannten Brennelemente und der Reaktorstilllegung. Diese und die vorstehenden Schätzungen basieren auf konservativen Annahmen. Die tatsächlichen Mengen an radioaktiven Abfällen in Europa sind wahrscheinlich höher. Mit einem Anteil von 30 Prozent würden in Frankreich die größten Mengen an radioaktiven Abfällen in Europa anfallen, gefolgt von Großbritannien (20 Prozent), der Ukraine (18 Prozent) und Deutschland (8 Prozent). In diesen vier Ländern fallen mehr als 75 Prozent der europäischen radioaktiven Abfälle an.

Abgesehen von Russland, das noch immer in der Produktion von Uran aktiv ist, haben Deutschland und Frankreich die größten Bestände an radioaktiven Abfällen aus dem Uranabbau in Europa. Offiziell hat die frühere französische Uranbergbau-Industrie 50 Millionen Tonnen Abraum produziert, aber unabhängige Experten schätzen, dass die Menge weitaus größer ist. Die frühere Deutsche Demokratische Republik (DDR) hat weitaus größere Mengen an Uranerz als Frankreich abgebaut. Die Hinterlassenschaften dieses Bergbaus umfassen ungefähr 32 km² an Anlagenbereichen, 48 Halden mit einem Volumen von schwachaktivem Gestein von 311 Millionen m³ und vier Absetzteiche mit einem Fassungsvermögen von 160 Millionen m³ radioaktiver Schlämme. Heutzutage importiert die EU das meiste Uran, wodurch große Mengen von Atommüll außerhalb von Europa anfallen.



4. RISIKEN FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT

Radioaktive Abfälle bergen für die Umwelt und die menschliche Gesundheit Risiken. „Risiko“ ist hier definiert als eine Funktion von Gefährdung und Exposition: die wahrscheinlichste Folge einer Gefährdung, kombiniert mit der Wahrscheinlichkeit einer Aussetzung dieser Gefährdung. Dieses Kapitel stellt Atommüll mit höherer Radioaktivität (siehe Kapitel über Klassifizierungen) in den Mittelpunkt und hebt potentielle ungelöste Gefahren und Probleme hervor. Obwohl von Atommüll sowohl radiologische als auch chemische Risiken ausgehen, wird sich das Kapitel auf die erstgenannten Risiken konzentrieren, weil diese generell schwerwiegender sind.

Obwohl Risiken bei jedem einzelnen Schritt in der langen Brennstoffkette entstehen, wird sich dieses Kapitel auf die Gefahren und Risiken des bei den folgenden Schritten entstehenden Atommülls konzentrieren:

- Uranabbau, -aufbereitung, -anreicherung und Brennstoffherstellung;
- Betrieb der Atomkraftwerke;
- Handhabung abgebrannter Brennelemente;
- Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff; und
- Reaktorstilllegung.

4.1 STRAHLENRISIKEN DURCH ATOMMÜLL

Von Atommüll können verschiedene Arten von Strahlung ausgehen: Alphateilchen, Betateilchen und Gammastrahlen. Während sich Alphateilchen am einfachsten stoppen lassen, selbst durch dünne Barrieren wie Papier, sind deren Auswirkungen besonders schädlich. Diese sind beim Einatmen oder Aufnehmen sehr schädlich und haben eine Strahlung, deren Gewichtung um den Faktor zwanzig Mal größer ist als Gammastrahlen pro Einheit der Exposition. Betateilchen sind stärker durchdringend als Alphateilchen, aber sie können noch durch dichtere Materialien, wie Plastik und Aluminium, abgeschirmt werden. Gammastrahlen sind sehr durchdringend; dichte Materialien, wie Blei und dicker Beton, sind erforderlich, um diese Strahlen abzuschirmen.

Die von Atommüll ausgehende Strahlung ist karzinogen, mutagen und teratogen (eine teratogene Substanz ist eine Substanz, die einen Fötus oder Embryo schädigen kann). Radiogene⁶⁶ Krebsrisiken sind abhängig von der Art der Krebserkrankung, des exponierten Gewebes, der Dosis, der Dosisrate und der Art der Strahlung. Das letztendliche Risiko für Personen wird auch abhängig sein von deren Geschlecht, Alter und der Zeit, die seit der Exposition vergangen ist. Strahlung ist darüber hinaus in hohem Maße in einem breiten Spektrum von anderen Krankheiten impliziert, einschließlich von kardiovaskulären Krankheiten, Schlaganfälle, Grauem Star und psychischen Folgen.

⁶⁶ „Radiogen“ bezeichnet die Materien oder Effekte, die durch radioaktiven Zerfall entstanden sind.

Gemäß der Internationalen Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection – ICRP) führt eine externe Strahlendosis in Höhe von einem Sievert (Sv) auf den ganzen Körper zu einem ungefähr zehnpromzentigen Risiko einer tödlichen Krebserkrankung bei Erwachsenen. Allerdings hat die ICRP später ihre Schätzung um die Hälfte auf 5 Prozent durch die Verwendung eines Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor oder DDREF (Dose and Dose-rate effectiveness factor) von zwei für solide Tumoren reduziert.⁶⁷ Der DDREF wurde früher dazu verwendet, um die Risiken zu reduzieren, die sich aus den Expositionen von Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Japan in Bezug auf niedrig dosierte Strahlung und Strahlung mit einer niedrigen Dosisleistung ergeben. Ältere Studien in Bezug auf Zellen und Tiere hatten gezeigt, dass diese Expositionen weniger gefährlich waren als solche in Bezug auf höheren Dosen mit höheren Dosisleistungen. Neuere Studien bei Menschen haben jetzt gezeigt, dass die Verwendung dieses DDREF falsch ist.^{68, 69} Seit 2013 haben die meisten internationalen Behörden aufgehört, den DDREF zu verwenden, sodass sich das reale Risiko einer tödlichen Krebserkrankung auf mindestens 10 Prozent pro Sv erhöht hat. Unglücklicherweise hat die ICRP nicht aufgehört, den DDREF zu verwenden.⁷⁰ Also haben Regierungen und die ICRP nicht die angenommenen erhöhten Strahlenrisiken anerkannt und haben außerdem die Strahlengrenzen nicht verschärft. Es gibt immer noch keinen internationalen Konsens in Bezug auf Strahlenrisiken. Es ist allerdings eindeutig, dass die Empfehlungen der ICRP konservativ sind.

Radioaktive Abfälle können ein breites Spektrum von Radionukliden enthalten, deren Atome instabil sind. Wenn deren Kerne zerfallen, entstehen diverse Arten von Strahlung. Viele dieser Atome haben eine hohe Radiotoxizität; dies ist der Grad, in welchem ein Radionuklid einen Organismus schädigen kann. Deren Halbwertszeiten – der Zeitraum, der benötigt wird, damit die Hälfte der ursprünglichen Radioaktivität zerfällt – sind oft extrem lang und können Tausende oder selbst Millionen von Jahren betragen.

Die nachfolgenden Faktoren sind wichtig, um das Risiko eines Radionuklids in Bezug auf einen Organismus abzuschätzen:

- die radioaktiven Zerfallsprozesse: Die Emission von Alphateilchen, Betateilchen und Gammastrahlen;
- die chemischen Bestandteile, die das Radioisotop enthält;
- die Löslichkeit in Wasser;
- die Transportarten durch die Umgebung;
- die relative biologische Wirksamkeit: Das Verhältnis zwischen den Schäden die von zwei unterschiedlichen Arten von Strahlungen, beim gleichen Maß an absorbierte Energie, verursacht werden;
- die Radiotoxizität: Diese basiert üblicherweise auf der spezifischen Aktivität, angegeben als Radioaktivität in Becquerel (Bq) pro Gramm;

⁶⁷ ICRP, „The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection“, ICRP Publication 103, 2007.

⁶⁸ UNSCEAR, „Scientific Annex A—Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami“, in „UNSCEAR 2013—Report to the General Assembly with Scientific Annexes“, Band I, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, April 2014.

⁶⁹ World Health Organization, „Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation“, 11. August 2013.

⁷⁰ ICRP, „Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk“, ICRP Publikation 99, *Annals of the ICRP*, Vol. 35(4), 2005.

- der Dosiskonversionsfaktor, der Becquerel zu Sievert konvertiert;
- in den meisten Fällen werden die Expositionen eher intern als extern sein, sodass die Dosen und Risiken auch abhängig sind von deren Aufnahme- und Ausscheidungsraten der Menschen.

Es hat bis jetzt noch kein angemessenes Gefahrenklassifikationssystem die vorstehenden Faktoren für Radionuklide in Betracht gezogen. Solche Systeme existieren bereits für Chemikalien und Biozide, und es wurden Forderungen erhoben, ein solches System für Atommüll einzurichten⁷¹.

4.2 RISIKEN DES URANABBAUS, AUFBEREITUNG, ANREICHERUNG UND BRENNSTOFFHERSTELLUNG

Der Uranabbau, die Aufbereitung/Konversion, die Anreicherung und die Brennstoffherstellung werden insgesamt als ‚front end‘ der nuklearen Brennstoffkette bezeichnet. Bei jedem dieser Schritte entstehen Gesundheitsrisiken. Uran ist eine radioaktive Substanz, die als natürliches Vorkommen in der Erdkruste existiert. Die Ablagerungen sind in den Gebieten auf der Welt stärker konzentriert, in denen dieses Erz gewonnen und verarbeitet wird. Der hierbei entstehende Abraum und Schlämme sind die ersten radioaktiven Abfälle innerhalb der nuklearen Brennstoffkette. Es ist weitgehend anerkannt, dass Strahlenbelastung durch Uran und dessen Zerfallsprodukte wesentlich verantwortlich ist für die Gesamtbelastung auf Gesundheit und Umwelt, die durch die nukleare Brennstoffkette verursacht wird.⁷² Nach Angaben der Industrie hat sich der Uranabbau seit 2011 weltweit verringert. Die Ausgaben für die Uranexploration und Minerschließung sind rückläufig. Seit 2014 hat sich dieser Rückgang beschleunigt und die Ausgaben in 2016 sind gegenüber 2014 um fast drei Viertel gesunken, von über US\$ 2 Milliarden (€₂₀₁₄ 1.6 Milliarden) im Jahr 2014 auf nur noch US\$ 663,668 Millionen (€₂₀₁₆ 0.6 Milliarden) im Jahr 2016.⁷³

Innerhalb der Europäischen Union gibt es momentan praktisch keinen Uranabbau, aber bei den früheren Bergwerken in Frankreich, Deutschland, Portugal, der Tschechischen Republik und Rumänien finden kontinuierlich Aufräum- und Rekultivierungsarbeiten statt. Während der Bemühungen zur Rekultivierung der Abbaugelände in der Tschechischen Republik, in Deutschland und Ungarn werden geringe Mengen an Uran gewonnen; es ist unklar, ob noch immer eine geringe Menge (einige wenige Dutzend Tonnen pro Jahr) in Rumänien momentan abgebaut wird.

GESUNDHEITSRISIKEN DURCH STRAHLENBELASTUNG DURCH URAN

Die im Zusammenhang mit der Strahlenbelastung durch Uran (einschließlich von abgereichertem Uran⁷⁴) entstehenden Gesundheitsrisiken beinhalten Nierenerkrankungen, Atemwegserkrankungen, DNA-Schäden, endokrine Störungen, Krebserkrankungen und neurologische Defekte.^{75, 76} Populationen,

⁷¹ Gerald Kirchner, „A New Hazard Index for the Determination of Risk Potentials of Disposed Radioactive Wastes“, Universität Bremen, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 11(1), 1990, S. 71-95.

⁷² IAEA, „Environmental Contamination from Uranium Production Facilities and Their Remediation“, Konferenz Verfahren des „Workshop On Environmental Contamination From Uranium Production Facilities And Their Remediation“, IAEA, 11-13. Februar 2004, Lissabon, 2005.

⁷³ NEA und IAEA, „Uranium 2018: Resources, Production and Demand“, NEA Nr. 7413, Paris, 2019.

⁷⁴ Abgereichertes Uran (DU) ist ein Nebenprodukt der Urananreicherung und umstritten: In einigen Ländern wird es von militärischen Streitkräften zur Strahlenabschirmung und als Munition verwendet, während es in anderen Ländern verboten ist. Weitere Informationen bezüglich abgereichertes Uran und die verbundenen Gefahren, siehe: UNIDIR, „Uranium Weapons“, United Nations Institute for Disarmament Research, „Uranium Weapons“, *Disarmament Forum*, UNIDIR/DF/2008/3, Oktober 2008, <http://www.unidir.org/files/publications/pdfs/uranium-weapons-en-328.pdf>.

⁷⁵ Sam Keith, Obaid Faroon, Nickolette Roney et al., „Toxicological profile for uranium“, U.S Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2013.

⁷⁶ James Wilson und Mike Thorne, „An assessment and comparison of the chemotoxic and radiotoxic properties of uranium compounds“, Integrated Project Team on Uranium, ASSIST Bericht im Auftrag von Radioactive Waste Management Limited (RWM), Februar 2015.

die einer Strahlenbelastung durch Uran ausgesetzt sind, sollten im Hinblick auf erhöhte Risiken für ihrer Fortpflanzungsfähigkeit und bezüglich Krebserkrankungen, die Fruchtbarkeitsprobleme auslösen, überwacht werden.⁷⁷

Tier- und Zellstudien haben gezeigt, dass die Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Uran aufgrund dessen Affinität zur DNA⁷⁸ und der potentiellen Kombination dessen chemischen und radiologischen Eigenschaften bestehen, weil Uran als Schwermetall sowohl chemische als auch radiologische Auswirkungen hat. Es wird vermutet, dass diese eine tumorauslösende und tumorfördernde Rolle spielen könnten.⁷⁹ Der Bericht konzentriert sich auf U-238, das 99,27 Prozent des Natururans ausmacht.

Der Rest setzt sich zusammen aus U-235 (0,72 Prozent) und U-234, einem Zerfallsprodukt von U-238 (0,0055 Prozent). Das im Erz vorkommende Uran wird ausnahmslos von Zerfallsprodukten von U-238 begleitet.⁸⁰ Es wird davon ausgegangen, dass jedes einzelne der vorstehenden Nuklide gefährlicher ist als das Ausgangsnuklid U-238. Zusammen enthalten diese Zerfallsprodukte ungefähr das 14-fache an Radioaktivität als das Ausgangsnuklid U-238.

Das problematischste Zerfallsprodukt ist Radium-226, und zwar aus drei Gründen: Dessen Salze sind hauptsächlich löslich; es hat eine lange Halbwertszeit (1.760 Jahre); und es gibt Gammastrahlen ab. Ein weiteres gefährliches Nuklid ist Radon-222 (Halbwertszeit 3,8 Tage). Weil es sich hierbei um ein geruchloses, farbloses Gas handelt, verbreitet sich dieses und dessen Zerfallsprodukte leicht in der Umgebung. Die Strahlenbelastung durch Radongas gilt als weltweit zweithäufigste Ursache für Lungenkrebs nach Tabakkonsum.⁸¹ Die US-Amerikanische Umweltschutzbehörde (EPA – Environmental Protection Agency) hat geschätzt, dass die Strahlenbelastung durch Radon in Räumen ca. 21.000 Lungenkrebstote jährlich in den USA verursacht bzw. hierzu beiträgt.⁸²

Teilweise aus diesen Gründen hat die ICRP geschätzt, dass ein zusätzliches Lebenszeitrisiko von 5×10^{-4} pro Working Level Month (WLM)⁸³ als Risikokoeffizient für radon-induzierten Lungenkrebs verwendet werden sollte, wodurch sich die bisherige Schätzung verdoppelt.⁸⁴ Diese Krebsrisiken werden entweder unter Verwendung des Excess Relative Risk (ERR) Modells oder des Excess Absolute Risk (EAR) Modells

⁷⁷ Stefanie Raymond-Whish, Loretta P. Mayer, L.P., Tamara O'Neal et al., „Drinking Water with Uranium below the U.S. EPA Water Standard Causes Estrogen Receptor-Dependent Responses in Female Mice“, *Environmental health perspectives*, Vol. 115(12), Dezember 2007, S. 1711-1716.

⁷⁸ Alexandra C. Miller, Michael Stewart, Kia Brooks et al., „Depleted uranium-catalyzed oxidative DNA damage: absence of significant alpha particle decay“, *Journal of inorganic biochemistry*, Vol. 91(1), 25. Juli 2002, S. 246-252.

⁷⁹ Alexandra C. Miller, Kia Brooks et al., „Effect of the militarily-relevant heavy metals, depleted uranium and heavy metal tungsten-alloy on gene expression in human liver carcinoma cells (HepG2)“, *Molecular and cellular biochemistry*, Vol. 255(1-2), Januar 2004, S. 247-256.

⁸⁰ Einschließlich thorium-234, protactinium-234m, protactinium-234, thorium-230, radium-226, radon-222, polonium-218, actinium-218, radon-218, blei-214, bismut-214, polonium-214, thallium-210, blei-210, bismut-210, polonium-210, thallium-206, und schließlich blei-206, welches stabil ist.

⁸¹ Sarah Darby, D. Hill, Anssi Auvinen et al., „Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies“, *BMJ*, Vol. 330(7485), 27. Januar 2005, S. 223.

⁸² David J. Pawel und Jerome S. Puskin, „The US Environmental Protection Agency's assessment of risks from indoor radon“, *Health physics*, Vol. 87(1), Juli 2004, S. 68-74.

⁸³ Die Einheit Working Level Month (WLM) wurde speziell für den Arbeitsschutz im Uranbergbau eingeführt und erfasst die Strahlenexposition, die durch Radon und seine Zerfallsprodukte in der Atemluft entsteht. Laut BfS, ist ein Working Level (WL) definiert als „beliebige Kombination von kurzlebigen Radon-Folgeprodukten in einem Liter Luft, deren Zerfall zu einer Emission von 130.000 Megaelektronenvolt ($1,3 \cdot 10^5$ MeV) potentieller Alphaenergie pro Liter Luft führt. Ist eine Person 170 Stunden (einen Arbeitsmonat) lang einem WL ausgesetzt, resultiert eine Exposition von einem WLM. Siehe BfS, „Working Level Month“, Bundesamt für Strahlenschutz, o.D. https://www.bfs.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/W/working-level-month.html;jsessionid=1ADA58614AC1DD3A84026C51C3FB5778.2_cid349, Stand 27. August 2020.

⁸⁴ Margot Tirmarche, John D. Harrison, Dominique Laurier et al., „Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon“, International Commission on Radiological Protection, *Annals of the ICRP*, Vol. 40(1), 1. Februar 2010, S. 1-64.

ausgedrückt. ERR ist die proportionale Risikoerhöhung über die Hintergrundrate (d.h. wo keine Menschen der Strahlung ausgesetzt sind). EAR ist das zusätzliche Risiko zu der Hintergrundrate. Allerdings haben diverse ICRP-Autoren späterhin angemerkt, dass sich das Risiko tatsächlich auf 7×10^{-4} pro WLM erhöht hätte, wenn man die Lungenkrebsraten von Euro-Amerikanischen Männern statt der ungemessenen ICRP-Referenzraten verwendet hätte (nämlich Männer und Frauen und Euro-Amerikanische und Asiatische Bevölkerungen).⁸⁵ Mit anderen Worten, haben sich die geschätzten Risikoraten für die meisten Bergleute im Uranbergbau seit 1993 eher verdreifacht als verdoppelt. Dieses erhöhte Bewusstsein bezüglich der Risiken bergbaulicher Tätigkeiten der Urangewinnung hat sich jedoch nicht in strikteren Sicherheitsstandards für die Beschäftigten niedergeschlagen.

URANABBAU

Obwohl viele der Uranbergwerke heutzutage geschlossen sind, bleibt die Geschichte des Uranbergbaus weltweit trostlos, mit vielen Unfällen und Berichten über Krankheiten unter den Beschäftigten im Uranbergbau. Ältere epidemiologische Studien haben signifikante Überschreitungen bei Lungenkrebs bei Arbeitern im Uranbergbau festgestellt.⁸⁶

Der Bergbaukomplex Wismut in der ehemaligen DDR ist vielleicht das am besten dokumentierte Beispiel in Europa. Der von der Sowjetunion betriebene Uranbergbaukomplex war bis 1996 in Betrieb. 59.000 von den beschäftigten Bergleuten wurden zwischen 1946 und 1989 untersucht. Die Forscher stellten einen signifikanten Anstieg bei Lungenkrebsrisiko im Zusammenhang mit einer Erhöhung der Strahlenbelastung durch Radon fest (ERR/WLM = 0,0019).⁸⁷ Eine Aktualisierung dieser Studie hat gezeigt, dass sich das Lungenkrebsrisiko tatsächlich um das Dreifache (auf ERR/WLM = 0,006) bei der ausgeweiteten Überwachungsdauer bis zum Jahre 2013 erhöhte.⁸⁸ Darüber hinaus haben die Autoren festgestellt, dass 3.942 Bergleute aus der Kohorte während des verlängerten Beobachtungszeitraums von 1946 bis 2013 an Lungenkrebs gestorben sind. Leider hat die neue Studie die Anzahl der Toten nicht aufgeführt, die an extra-pulmonalen Krebsarten, an Herzkrankheiten und zerebrovaskulären Erkrankungen verstorben sind, die bei der früheren Kohortenstudie beobachtet wurden.

URANABRAUMHALDEN

Nach dem Abbau, der Gewinnung und der Extraktion des Urans aus dem Erz werden die Restmaterialien in Abraumhalden oder Absetzbecken gepumpt. Da der durchschnittliche Urangehalt in dem Erz üblicherweise ungefähr 0,1 Prozent bis 0,15 Prozent beträgt, endet fast das gesamte Erz in Abraumaterialien. Das Ergebnis sind riesige Mengen an Abraum bei den Uranminen. Zum Beispiel haben die kanadischen Bergbaugesellschaften bis zum Jahre 2016 ungefähr 200 Millionen Tonnen Abraum bei den geschlossenen Bergwerken und weitere 17 Millionen Tonnen bei den in Betrieb befindlichen Bergwerken angehäuft (zusätzlich des Taubgesteins und kontaminiertes Wasser).⁸⁹

⁸⁵ Margot Tirmarche, John Harrison, Dominique Laurier et al., „Risk of lung cancer from radon exposure: contribution of recently published studies of uranium miners“, *Annals of the ICRP*, 41(3-4), Februar 2012, S. 368-377.

⁸⁶ Bernd Grosche, Michaela Kreuzer, M. Kreischer et al., „Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946-1998“, *British journal of cancer*, Vol. 95(9), 6. November 2006, S. 1280.

⁸⁷ Michaela Kreuzer, Bernd Grosche, Maria Schnelzer, et al., „Radon and risk of death from cancer and cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study: follow-up 1946-2003“, *Radiation and Environmental Biophysics*, Vol. 49(2), Mai 2010, S. 177-185.

⁸⁸ Michaela Kreuzer, Christina Sobotzki et al., „Factors modifying the radon-related lung cancer risk at low exposures and exposure rates among German uranium miners“, *Radiation Research*, Vol. 189(2), Dezember 2017, S. 165-176.

⁸⁹ Natural Resources Canada, „Inventory of Radioactive Waste in Canada 2016“, Kanadische Regierung, 2016, https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/uranium-nuclear/17-0467%20Canada%20Radioactive%20Waste%20Report_access_e.pdf, Stand 24. Mai 2019.

Aufgrund der beim Uranabbau in vielen Fällen verwendeten großen Mengen an Schwefelsäure als Extraktionslösung werden hohe Konzentrationen an Schwermetallen, wie Kupfer, Zink, Nickel und Blei, mobilisiert, die für Tiere giftig sind. Die starke Verseuchung des Grundwassers stellt ein permanentes Risiko dar. Health Canada, das Gesundheitsministerium der kanadischen Regierung, hat davor gewarnt, dass „die Nahrungskette verseucht werden kann, falls keine entsprechende Schadensminderung eingeführt wird. Fische, wildlebende Tiere, Vegetation, Nahrungsmittel und Trinkwasser sind einem erhöhten Risiko ausgesetzt, falls Freisetzungen durch Überlauf oder Leckagen eintreten. Die Notwendigkeit zum Management des Wassers aus den Abfallmanagement-Bereichen ist wichtig, insbesondere falls sich in der Nähe Trinkwasserquellen befinden“.⁹⁰

Unberührtes Erz enthält alle die radioaktiven Tochterisotope von Uran, die vorstehend in diesem Artikel aufgeführt sind, im natürlichen Gleichgewicht; deren Strahlung in Becquerel bleibt deshalb konstant. Uranerz-Abraum enthält alle Produkte der U-238-Zerfallskette. Die Gesamtradioaktivität dieser Nuklide beträgt ungefähr 80 Prozent der Radioaktivität in dem ursprünglichen Erz, allerdings ist der genaue Prozentsatz abhängig davon, wie lange das Erz Luft ausgesetzt war. Abraummaterialien können darüber hinaus signifikante Mengen an gefährlichen Chemikalien enthalten, wie zum Beispiel Kupfer, Zink, Nickel, Blei, Arsen, Molybden und Selen, abhängig von der Erzquelle und den Reagenzien in dem Aufbereitungsverfahren.

Uranabbaumaterialien bleiben problematisch, weil deren Radionuklide vielfache Pfade zu Lebewesen aufweisen. Radongas und die radioaktiven Zerfallsprodukte von Radon können inhaliert werden. Radioaktive und toxische Chemikalien können zusammen mit Nahrung und Wasser aufgenommen werden, und eine externe Gammastrahlung wird durch die Abraummaterialien abgegeben. Im Gegensatz zu der üblichen Annahme ist die Inhalierung der wichtigste Pfad, da die Kollektivdosis beträchtlich größer ist als die von den anderen Expositionspfaden.

Die Existenz von Abraumhalden und Bergeteichen bleibt problematisch, weil eines der Zerfallsprodukte (Thorium-230, welches eine Halbwertszeit von 80.000 Jahren aufweist) die vielen Nuklide seiner Zerfallskette über Jahrtausende hinweg generiert. Diese akkumulieren unter Abfallbehältern, oder können die Behälter durchdringen, abhängig von den Bodentiefen und der Durchlässigkeit der Lagerbehälterarten, die momentan verwendet werden. Eine solche Durchdringung bedeutet, dass das radioaktive Blei-210 oder Polonium-210 durch Pflanzenaufnahmen, die Oberfläche über den Abraumhalden in hohen Konzentrationen erreichen können (diese Materialien haben Halbwertszeiten von 22,3 Jahren bzw. 138 Tagen).⁹¹

Nur wenige Studien haben die Risiken quantifiziert, die von Uranabraumhalden ausgehen. In einem Bericht aus dem Jahr 1983 hat die US-Amerikanische Umweltschutzbehörde (EPA) das maximale zusätzliche Lebenszeitrisko für Lungenkrebs für Anwohner, die in der Nähe einer nicht-abgedeckten Abraumhalde von 80 Hektar (0,8 km²) leben, mit zwei Fällen pro 100 Anwohner geschätzt.⁹² Radongas aus Abraumhalden kann sich über Wind und Regen verteilen, sodass die Gefahr besteht, dass Menschen

⁹⁰ Federal/Provincial/Territorial Committee on Environmental and Occupational Health, „Canadian Handbook on Health Impact Assessment—Volume 4: Health Impacts By Industry Sector“, Gesundheitsministerium, Kanadische Regierung, November 2004, <http://publications.gc.ca/collections/Collection/H46-2-04-363E.pdf>, Stand 24. Mai 2019.

⁹¹ Danyl Pérez-Sánchez und Michael Charles Thorne, „An investigation into the upward transport of uranium-series radionuclides in soils and uptake by plants“, *Journal of Radiological Protection*, Vol. 34(3), 1. Juli 2014, S. 545.

⁹² U.S.EPA, „40 CFR Part IV Environmental Standards for Uranium and Thorium Mill Tailings at Licensed Commercial Processing Sites; Final Rule“, 40 CFR Part 192, Federal Register Vol. 48, Nr. 196, 7. Oktober 1983, S. 45940, <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-1983-10-07/content-detail.html>.

auch in größeren Entfernungen dieser Strahlung ausgesetzt werden. Während man davon ausgeht, dass die Risiken für diese einzelnen Personen gering sind, dürfen diese Risiken jedoch nicht vernachlässigt werden, weil Strahlenrisiken bis herunter zur Nulldosis existieren. Da potentiell große Mengen an Menschen der Strahlung ausgesetzt sein können, müssen deren Kollektivdosen und –risiken abgeschätzt werden.⁹³

AUFBEREITUNG, ANREICHERUNG UND BRENNSTOFFHERSTELLUNG

Die im Zusammenhang mit der Uranaufbereitung und -anreicherung stehenden Gesundheitsrisiken existieren hauptsächlich durch das Inhalieren und/oder Aufnehmen von Uran in dessen verschiedenen chemischen Formen. Bei dem Anreicherungsprozess von U-235 wird Urankonzentrat aus der Aufbereitung (U₃O₈) – dies wird auch als Yellowcake bezeichnet – zu Uranhexafluorid (UF₆) umgewandelt, ein sehr volatiles Gas, welches extrem chemisch reaktiv und radiologisch toxisch ist. Darüber hinaus reagiert UF₆ Gas unmittelbar mit Wasserdampf in Luft, wodurch Fluorwasserstoff (HF) entsteht, welches noch radioaktiver und toxischer ist; und bei niedrigen Konzentration Lungenschädigungen, Ödemen und die Zersetzung der Lungenschleimhaut verursacht. Es führt darüber hinaus zu Anfällen und sogar zum Tod bei Menschen, die hohen Konzentrationen ausgesetzt sind.⁹⁴

4.3 RISIKEN AUS DEM BETRIEB VON ANLAGEN

RISIKEN IM ZUSAMMENHANG MIT GASFÖRMIGEN, FLÜSSIGEN UND FESTEN ABFÄLLEN

Während des Normalbetriebs produzieren Atomkraftwerke eine signifikante Menge an festen, flüssigen und gasförmigen Abfällen.

Risiken im Zusammenhang mit der routinemäßigen Lagerung von festen Abfällen ergeben sich aus den begrenzten Lagerkapazitäten und einer unzureichenden Sicherheit vor Ort; diese erhöhen sich drastisch, wenn Atommüll bei Fehlfunktionen oder Unfälle innerhalb der Nuklearanlagen beteiligt ist. In Anbetracht der geplanten Verlängerungen der Laufzeit von Atomkraftwerken in vielen Ländern weltweit⁹⁵ könnte die Anhäufung von gefährlichen Betriebsabfällen in älteren Atomkraftwerken zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung führen.

In Anbetracht der geplanten Verlängerungen der Laufzeit von Atomkraftwerken in vielen Ländern weltweit könnte die Anhäufung von gefährlichen Betriebsabfällen in älteren Atomkraftwerken zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung führen.

Zusätzlich zu den festen Abfällen geben Atomkraftwerke radioaktive Gase und Flüssigkeiten in die Umgebung ab. Die hauptsächlichsten radioaktiven Freisetzungen sind Tritium (Wasserstoff-3, Halbwertszeit 12,3 Jahre), Kohlenstoff-14 (5.730 Jahre), Krypton-85 (10,8 Jahre), Argon-41 (1,8 Stunden) und eine Reihe von Jod-Isotopen, einschließlich von Jod-129 (16 Millionen Jahre). Der größte Anteil der jährlichen Luftfreisetzungen (ungefähr 70 bis 80 Prozent) wird während des jährlichen Austauschs der Kernbrennstoffe freigesetzt. Diese erhöhen die geschätzten Dosen in Bezug auf Anwohner in der Nähe um einen Faktor von mindestens 20 im Vergleich zu den durchschnittlichen jährlichen Freisetzungen.⁹⁶ Die hauptsächlichsten Risikotreiber sind die Emissionen von Tritium und Kohlenstoff-14. Obwohl die Emissionen von

⁹³ Ian Fairlie und David Sumner, „In Defence of Collective Dose“, *Journal of Radiological Protection*, Vol. 20(1), März 2000, S. 9.

⁹⁴ NLM, „Uranium Hexafluoride“, US National Library of Medicine, o.D., CASRN: 7783-81-5, <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+4501>, Stand 29. Mai 2019.

⁹⁵ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

⁹⁶ NDAWG, „Short-Term Releases to the Atmosphere“, National Dose Assessment Working Group, UK Health Protection Agency, 2011, <https://srp-uk.org/resources/national-dose-assessment>, Stand 29. Mai 2019.

radioaktiven Edelgasen geringfügig höher als die von Tritium liegen, geht man davon aus, dass diese Edelgase nicht wesentlich zu den Gesamtdosen der Reaktoremissionen beitragen.

Gasförmige Emissionen resultieren in höheren Individual- und Kollektivdosen, als dies durch flüssige Freisetzen geschieht. Diese könnten zu einem höheren Risiko der Entwicklung von Leukämie in der Nähe von Atomkraftwerken beitragen. Der erste berichtete Leukämiecluster in der Nähe von Atomanlagen in Europa lag im Jahre 1984 in Großbritannien in der Nähe der Nuklearanlage Sellafield. In den nachfolgenden Jahren traten in erhöhtem Maße Fälle von Kinderleukämie in der Nähe anderer Nuklearanlagen in Großbritannien,^{97, 98} in Frankreich,⁹⁹ und in Deutschland auf.¹⁰⁰

Im Jahre 2007 hat die deutsche Regierung eine große epidemiologische Studie unter dem Namen „Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie)“¹⁰¹ veröffentlicht. Diese Studie stellte eine Erhöhung bei Leukämie um 120 Prozent und eine Erhöhung um 60 Prozent bei allen Krebsarten von Kindern unter 5 Jahren, die innerhalb eines Radius von fünf Kilometern um alle deutsche Reaktoren herum lebten, fest.^{102, 103} Die Erhöhung des Risikos in Verhältnis zur Nähe zu Atomkraftwerken war für alle Krebsarten statistisch signifikant. Die Studie hat die internationale Debatte über Kinderleukämie in der Nähe von Atomkraftwerken erneut befeuert. Forscher haben ähnliche Studien in Großbritannien,¹⁰⁴ in Frankreich¹⁰⁵ und in der Schweiz¹⁰⁶ durchgeführt. Insgesamt gesehen vermitteln die Forschungsarbeiten eine starke statistische Evidenz, dass sich das Risiko von Leukämie in der Nähe von Atomkraftwerken erhöht.

Diverse Studien haben verschiedene mögliche Ursachen für das Phänomen identifiziert, einschließlich der vorgeburtlichen Expositionen der Väter durch berufsbedingten Dosen,¹⁰⁷ ein postuliertes Virus aufgrund der Vermischung von Bevölkerungen,¹⁰⁸ einer ungewöhnlichen Reaktion auf Infektionskrankheiten bei Kindern,¹⁰⁹ einer genetischen Prädisposition für Krebs, einer hohen Markierung von Embryos/

⁹⁷ David Forman, Paula Cook-Mozaffari, Sarah Darby et al., „Cancer near nuclear installations“, *Nature*, Vol. 329(6139), 8. Oktober 1987, S. 499-505.

⁹⁸ Martin J. Gardner, „Father’s occupational exposure to radiation and the raised level of childhood leukemia near the Sellafield nuclear plant“, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 94, August 1991, S. 5-7.

⁹⁹ Dominique Pobel und Jean-François Viel, „Case-control study of leukemia among young people near La Hague nuclear reprocessing plant: the environmental hypothesis revisited“, *British Medical Journal*, Vol. 314, 11. Januar 1997, S. 101.

¹⁰⁰ Peter J. Baker und David G. Hoel, „Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities“, *European Journal of Cancer Care*, Vol. 16(4), August 2007, S. 355-363.

¹⁰¹ Peter Kaatsch, Claudia Spix, Sven Schmiedel et al., „Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie)“, Vorhaben 3602S04334, Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz, Deutsches Kinderkrebsregister, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, 2007.

¹⁰² Peter Kaatsch, Claudia Spix, Renate Schulze-Rath et al., „Leukemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants“, *International Journal of Cancer*, Vol. 122(4), 15. Februar 2008, S. 721-726

¹⁰³ Claudia Spix, Sven Schmiedel, Peter Kaatsch et al., „Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980-2003“, *European Journal of Cancer*, Vol. 44(2), Januar 2008, S. 275-284.

¹⁰⁴ COMARE, „14th Report—Further Consideration of the Incidence of Childhood Leukemia Around Nuclear Power Plants in Great Britain“, Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, Health Protection Agency, 14. Bericht, 6. Mai 2011.

¹⁰⁵ Claire Sermage-Faure, Dominique Laurier, Stéphanie Goujon-Bellec et al., „Childhood leukemia around French nuclear power plants—the Geocap study, 2002-2007“, *International Journal of Cancer*, Vol. 131(5), 5. Januar 2012, S. E769-E780.

¹⁰⁶ Ben D. Spycher, Martin Feller, Marcel Zwahlen et al., „Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland: a census-based cohort study“, Schweizerische Pädiatrische Onkologie Gruppe und Swiss National Cohort, *International Journal of Epidemiology*, Vol. 40(5), Oktober 2011, S. 1247-1260.

¹⁰⁷ Martin J. Gardner, Michael P. Snee, Andrew J. Hall et al., „Results of Case-Control Study of Leukaemia and Lymphoma Among Young People Near Sellafield Nuclear Plant in West Cumbria“, *British Medical Journal*, Vol. 300, Nr. 6722, 17. Februar 1990, S. 423-429.

¹⁰⁸ L.J. Kinlen, „Childhood Leukemia and Population Mixing“, Leserbrief, *Pediatrics*, Vol. 114(1), July 2004, S. 330-331.

¹⁰⁹ Mel Greaves, „Infection, immune responses and the aetiology of childhood leukemia“, *Nature Reviews Cancer*, Vol. 6(3), März 2006, S. 193.

Föten von schwangeren Frauen in der Nähe von Atomkraftwerken,¹¹⁰ oder einer Kombination dieser Faktoren. Wie auch immer die endgültige Erklärung lautet, zeigt die Evidenz weltweit, dass das Wohnen in der Nähe von Atomkraftwerken schwerwiegende Gesundheitsrisiken für Babys und Kleinkinder mit sich bringt.¹¹¹ Obwohl der Beweis eines Zusammenhangs des Wohnens in der Nähe von Atomkraftwerken in hohem Maße darauf hindeuten, dass dies schwerwiegende Gesundheitsrisiken birgt, können die Gründe nicht eindeutig festgelegt werden, sodass die Frage weiterhin kontrovers bleibt.

RISIKEN FÜR BESCHÄFTIGTE IN NUKLEARANLAGEN

Die durchschnittliche Exposition von Beschäftigten in Atomanlagen in europäischen Ländern hat sich generell verringert. Zeitarbeiter, Beschäftigte von Subunternehmern in Atomanlagen und das Bedienpersonal in den Anlagen der nuklearen Brennstoffkette werden weiterhin einem Großteil der Kollektivdosis ausgesetzt. Obwohl sich eventuell die Expositionen verringern, erhöhen sich die diesbezüglich wahrgenommenen Risiken. Im Jahre 2015 hat eine groß angelegte epidemiologische Studie¹¹² durch Wissenschaftler aus nationalen Gesundheitsinstituten in den USA, Großbritannien und in Frankreich in Bezug auf mehr als 300.000 Beschäftigte in Nuklearanlagen festgestellt, dass deren Leukämierisiko mehr als doppelt so hoch wie das Risiko ausfällt, welches in einer früheren Studie festgestellt wurde.¹¹³ Eine zweite Studie, die wenige Monate später durchgeführt wurde – diesmal in Bezug auf alle soliden Tumore¹¹⁴ –, und zwar durch größtenteils dasselbe Wissenschaftlerteam, hat große absolute Risiken für solide Tumore ermittelt, und zwar mit 47 Prozent pro Gray (Gy)¹¹⁵ sehr viel höher als die Forscher erwartet hatten. Diese Risiken sind beträchtlich größer als die Schätzung des ICRP in Höhe von 5 Prozent pro Gy.

4.4 RISIKEN DURCH ABGEBRANNTEN BRENNNELEMENTE

Nachdem Kernbrennstoffe über einen Zeitraum von drei bis vier Jahren einer Kernspaltung ausgesetzt waren, gelten diese als ‚abgebrannt‘ oder ‚verbraucht‘ und werden in Abklingbecken gelagert. Allerdings ist das Adjektiv ‚verbraucht‘ irreführend, da der Kernbrennstoff weiterhin große Mengen an Radioaktivität über Zehntausende von Jahren abgibt. Zum Beispiel belaufen sich die Dosisraten bei nicht- abgeschirmten abgebrannten Brennelementen selbst nach 10 Jahren Kühlung auf 1 bis 100 Gy pro Stunde, je nach Art des Brennstoffs und des Zeitraums, den diese aus dem Reaktor entfernt worden sind. Eine Dosis von 4 bis 5 Gy gilt normalerweise als tödlich.¹¹⁶ Ein nicht-abgeschirmtes, gerade entladenes abgebranntes Brennelement gibt eine tödliche Dosis bei einem Meter Abstand in weniger als einer Minute ab. Aus diesem Grund werden abgebrannte Brennelemente entweder unter Wasser gehandhabt und in stark abgeschirmten Behältern zu den Abklingbecken an den Reaktorstandorten transportiert, oder diese werden in gleichermaßen abgeschirmten Behältern in Trockenlager verbracht. Die Strahlenbelastungen in der Nähe dieser Behälter variieren beträchtlich in Abhängigkeit von der Art des Brennstoffs (Uranoxid

¹¹⁰ Ian Fairlie, „A hypothesis to explain childhood cancers near nuclear power plants, *Journal of environmental radioactivity*“, *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 133, Juli 2014, S. 10-17.

¹¹¹ Dominique Laurier, Sophie Jacob et al., „Epidemiological studies of leukaemia in children and young adults around nuclear facilities: a critical review“, *Radiation Protection Dosimetry*, Oxford University Press, Vol. 132(2), 15. Oktober 2008, S. 182-190.

¹¹² Klervi Leuraud, David B. Richardson, Elisabeth Cardis et al., „Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study“, Koordiniert von der International Agency for Research on Cancer, *The Lancet Haematology*, Vol. 2(7), 22. Juni 2015, S. e276-e281.

¹¹³ Elisabeth Cardis, Martine Vrijheid et al., „Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries“, *British Medical Journal*, Vol. 331, 7. Juli 2005, S. 77.

¹¹⁴ David B. Richardson, Elisabeth Cardis, Robert D. Daniels et al., „Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)“, *BMJ*, 351, 20. Oktober 2015, S. h5359.

¹¹⁵ Gray ist eine Einheit der Energiedosis und gibt an wieviel Energie durch ionisierende Strahlung auf eine Masseneinheit eines Materials oder Gewebes übertragen wird. 1 gray entspricht der Übertragung von 1 joule pro Kilogramm des bestrahlten Materials.

¹¹⁶ U.S. NRC, „Lethal Dose (LD)“, Online glossary entry, <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/lethal-dose-ld.html>, Stand 29. Mai 2019.

oder Uran-Plutonium Mischoxyd), der Brennstoffausnutzung oder dem ‚Abbrand‘ und dem Alter des abgebrannten Brennelements. Die Dosisraten werden bei deutschen Castorbehältern für die Trockenlagerung bei einem Abstand von 1 Meter auf ungefähr 0,1 mSv pro Stunde (mSv/h) geschätzt und für französische TN28 Behälter auf 0,04 mSv/h.¹¹⁷

Die einzelnen Länder haben unterschiedliche Vorschriften in Bezug darauf, welchen Höchstwerten an Dosisraten Beschäftigte ausgesetzt sein dürfen. In Kanada beträgt die maximal erlaubte Exposition für Beschäftigte 2 mSv/h bei einem Kontakt mit einer Behälteroberfläche und 0,1 mSv/h bei einem Abstand von 1 Meter. In den USA beschränken die Vorschriften der die US-Amerikanische Atomaufsichtsbehörde (Nuclear Regulatory Commission-NRC) die Expositionen auf 10 mSv/h bei Kontakt und 0,1 mSv/h bei einer Entfernung von 2 Metern. Abgebrannte Brennelemente enthalten die größten Mengen an Radioaktivität bei radioaktiven Abfällen weltweit und bestehen aus Spalt- und Aktivierungsprodukten.¹¹⁸

RISIKEN IM ZUSAMMENHANG MIT ABGEBRANNTEN BRENNELEMENTEN IN ABKLINGBECKEN

Die fortgesetzte Praxis der Lagerung von abgebrannten Brennelementen über längere Zeiträume hinweg in Abklingbecken an den meisten Standorten von Atomkraftwerken weltweit stellt ein wesentliches Risiko für die Bevölkerung und die Umwelt dar.¹¹⁹ Abklingbecken mit abgebrannten Brennelementen müssen kontinuierlich überwacht und gekühlt werden, um die Zerfallswärme abzuleiten und sie müssen chemisch eingestellt werden, um die richtigen Alkalinitätswerte zu gewährleisten. Falls die Kühlung aus irgendwelchen Gründen ausfallen sollte, würde das Wasser in den Abklingbecken innerhalb weniger Tage verdampfen und die Brennelemente könnten sich entzünden, weil die Zirkoniumlegierung mit dem Sauerstoff in der Luft stark reagieren würde.¹²⁰ Dasselbe würde sich ereignen, wenn das Wasser des Abklingbeckens aus irgendeinem Grund auslaufen würde, zum Beispiel in Folge eines Wandbruchs oder von einem terroristischen Angriffs verursacht. Diese Probleme verschärfen sich im Laufe der Zeit aufgrund der Tatsache, dass sich die Dauer der Lagerung von abgebrannten Brennelementen in den Abklingbecken erhöht hat und diese mittlerweile, in vielen Fällen, routinemäßig über mehrere Jahrzehnte hinweg fortgesetzt wird.

Die fortgesetzte Praxis der Lagerung von abgebrannten Brennelementen über längere Zeiträume hinweg in Abklingbecken an den meisten Standorten von Atomkraftwerken weltweit stellt ein wesentliches Risiko für die Bevölkerung und die Umwelt dar. Abgebrannte Kernbrennstoffe enthalten den größten Teil der Radioaktivität des Atommülls weltweit und bestehen aus Spalt- und Aktivierungsprodukten.

¹¹⁷ William Wilkinson, „Radiation Dose Assessment for the Transport of Nuclear Fuel Cycle Materials“, World Nuclear Transport Institute, Juli 2006, https://www.wnti.co.uk/media/31656/IP8_EN_MAR13_V2.pdf, Stand 24. Mai 2019.

¹¹⁸ Die Hauptaktivierungsprodukte sind Plutonium-239, Plutonium-240, Plutonium-241, Plutonium-242 und Tritium. Auch eine Reihe an „leichteren“ Aktiniden bilden sich: Neptunium-237, Curium-242, Curium-244, Americium-241, und Americium-243. Es entstehen zusätzlich etwa 700 Spaltprodukte – hauptsächlich kurzlebig – in abgebrannten Brennstoffen. Unter den Hauptisotoptreiber befinden sich Caesium-134, Caesium-137, Strontium-90, Technecium-99 und Cobalt-60, weil deren Halbwertszeiten länger sind und sie starke Gammastrahlungen abgeben. Tritium (H-3), das radioaktive Wasserstoff Isotop wird auch als tertiäres Spaltprodukt gebildet.

¹¹⁹ Robert Alvarez, „Spent Nuclear Fuel Pools in the U.S.: Reducing the Deadly Risks of Storage“, Institute for Policy Studies, Mai 2011.

¹²⁰ Frank N. von Hippel und Michael Schoeppner, „Reducing the danger from fires in spent fuel pools“, Program on Science and Global Security, Princeton University, *Science & Global Security*, Vol. 24, Nr. 3, 2016, S. 141-173.

Im Jahre 2014 hat die US-Amerikanische Atomaufsichtsbehörde (NRC) untersucht, ob es erforderlich ist, die momentan in Abklingbecken an den Atomkraftwerken gelagerten abgebrannten Brennelemente in Trockenlager und Lagerstollen zu verlagern. Eine solche Verlagerung würde die Wahrscheinlichkeit und die Folgen eines Lagerbeckenfeuers reduzieren. Die Behörde hat die Schlussfolgerung gezogen, dass die projektierten Vorteile nicht die geschätzten Kosten in Höhe von US\$4 Milliarden (€₂₀₁₄ 3 Milliarden) eines kompletten Transfers rechtfertigen würden.¹²¹

Allerdings wurde der NRC-Bericht dafür kritisiert, dass das Risiko und die Folgen eines Feuers im Zusammenhang mit abgebrannten Brennelementen drastisch unterschätzt wurden; Modelle eines potentiellen Feuers an einem der US-amerikanischen Lagerstandorte von abgebrannten Brennelementen haben äußerst schwerwiegende Auswirkungen hypothetischer Freisetzungen von Nukliden geschätzt.¹²² Bei den Karten, was diese Modelle ergaben, waren radioaktive Wolken über große Bereiche von Nordamerika abgebildet. Der Hauptverfasser, Professor Frank von Hippel, Princeton University, warnte vor drastischen wirtschaftlichen Folgen: „Wir reden hier über Folgen im Bereich von Billionen von Dollar.“¹²³ Dieses Risiko betrifft nicht nur die USA, sondern auch die meisten Länder, die Atomkraftwerke betreiben, in denen wachsende Mengen an abgebrannten Brennelementen über zunehmend längere Zeiträume in Abklingbecken verbleiben.

Der Mangel an zuverlässigen technischen Lösungen und die politische Opposition gegen Projekte für Atommüllanlagen machen diese schwierige Situation noch problematischer. Die momentane Situation stellt beträchtliche Anforderungen an momentane Regierungen und zukünftige Generationen.

Mittlerweile gilt es als weitgehend akzeptiert, dass abgebrannte Brennelemente gut ausgelegte Lager für längere Zeiträume erfordern, um die Risiken von Freisetzungen der darin enthaltenen Radioaktivität in die Umgebung zu minimieren. Darüber hinaus sind Sicherheitsvorkehrungen erforderlich, um zu gewährleisten, dass weder Plutonium noch hochangereichertes Uran für eine militärische Nutzung verwendet wird.

4.5 RISIKEN IM ZUSAMMENHANG MIT DER WIEDERAUFARBEITUNG VON ABGEBRANNTEN BRENNELEMENTEN

Für das Management von abgebrannten Brennelementen existieren zwei wesentliche Möglichkeiten: Die langfristige Lagerung mit dem letztendlichen Ziel einer direkten Endlagerung und die Wiederaufarbeitung. Dieser Abschnitt erörtert die letztgenannte Methode. In den 1950er und 1960er Jahren während des Kalten Krieges haben Länder Wiederaufarbeitungsanlagen gebaut, um Waffen mit Plutonium herzustellen, welches aus abgebrannten Kernbrennstoffen extrahiert wurde.

Wiederaufarbeitung beinhaltet die Auflösung von abgebrannten Brennelementen in kochender konzentrierter Salpetersäure mit einer anschließenden physikalisch-chemischen Abtrennung des Plutoniums und Urans aus dem aufgelösten Brennstoff. Dieser schwierige, komplexe, teure und gefährliche Prozess resultiert in unzähligen Atomabfallströmen, sehr hohen Freisetzungen von Nukliden in die Luft und ins Meer und starken Strahlenbelastungen für die Beschäftigten und die allgemeine Bevölkerung.

¹²¹ Andrew Barto, Y. James Chang, Keith Compton et al., „Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor“, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. NRC, NUREG-2161, September 2014.

¹²² Frank N. von Hippel und Michael Schoeppner, 2017, „Economic Losses from a Fire in a Dense-Packed US Spent Fuel Pool“, *Science & Global Security*, Vol. 25(2), Mai 2017, S. 80-92.

¹²³ Richard Stone, „Spent fuel fire on US soil could dwarf impact of Fukushima“, *Science*, 24. Mai 2016, <https://www.sciencemag.org/news/2016/05/spent-fuel-fire-us-soil-could-dwarf-impact-fukushima>, Stand 25. Mai 2019.

Nur ungefähr 15 Prozent der abgebrannten Brennelemente werden wiederaufgearbeitet. Die meisten Länder haben die Wiederaufarbeitungsoption aufgegeben, und momentan praktizieren nur Frankreich und Russland eine Plutoniumabtrennung in industriellem Maßstab. Diese Länder, die in der Vergangenheit die Arbeiten für eine Reihe anderer Länder durchgeführt haben, arbeiten jetzt hauptsächlich ihren eigenen Brennstoff auf. Die Wiederaufarbeitung resultiert in großen Mengen von hochradioaktivem, flüssigem Abfall (HAL – Highly Active Liquid), der hitzeentwickelnd und extrem radioaktiv ist. Wie vorstehend hierunter beschrieben, stellen flüssige Abfälle schwerwiegende Probleme für das momentane Abfallmanagement dar. Ursprünglich sollten die flüssigen Abfälle verglast und in einer besser handhabbaren festen Form gelagert werden (diese werden als verglaste Abfälle bezeichnet). Allerdings haben sich solche Verfahren, obwohl diese in Frankreich verhältnismäßig erfolgreich waren, in Großbritannien und in den USA als schwierig erwiesen, und ein Großteil dieser Abfälle wird wahrscheinlich in naher Zukunft in flüssiger Form verbleiben. Zusätzlich zu den HAL-Abfällen resultiert die Wiederaufarbeitung darüber hinaus in den folgenden Abfallströmen:

- Freisetzungen von Radionukliden in die Luft;
- Ableitung von Radionukliden ins Meer;
- große Lagerbestände an abgetrenntem Plutonium;
- zehntausende Fässer mit abgetrenntem, wiederaufgearbeitetem Uran;
- tausende Stahlbehälter mit verglasten Abfällen;
- radioaktives Graphit aus AGR-Brennstoffhülsen;
- Betonsilos gefüllt mit Brennelementehüllen;
- Und viele andere radioaktive Abfälle, einschließlich von Schlämmen, Harzen und Filtern.

Die Kollektivdosen in Bezug auf die Weltbevölkerung, ausgehend von den langlebigen, gasförmigen Nukliden C-14 und I-129 und von den Substanzen mit mittlerer Halbwertszeit Kr-85 und H-3 (Tritium), die in Sellafield und La Hague freigesetzt werden, sind sehr groß, und zwar sehr viel größer als die Freisetzungen der Atomkraftwerke. Während jedwede Freisetzung von Alphastrahlern an Reaktorstandorten verboten ist, ist dies in La Hague innerhalb von Grenzwerten von 0,01 GBq bei gasförmigen und 140 GBq bei flüssigen Ableitungen erlaubt.¹²⁴

Die globale Kollektivdosis, abgekürzt auf 100.000 Jahre, die aus den Ableitungen der Wiederaufarbeitungsanlage La Hague resultiert, wurde mit ca. 3.600 Personen-Sv pro Jahr berechnet.¹²⁵ Die fortgesetzte Freisetzung in einer ähnlichen Größenordnung für die Betriebsjahre der Anlage von La Hague bis 2025 würde als mehr 3.000 zusätzliche Krebstote weltweit verursachen, falls man die lineare Theorie keines Schwellenwerts von Strahlung anwendet.

¹²⁴ Mycle Schneider und Yves Marignac, „Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France“, Research Report #4, International Panel on Fissile Materials, April 2008, http://fissilematerials.org/publications/2008/05/spent_nuclear_fuel_reprocessin.html, Stand 24. Mai 2018.

¹²⁵ Rachel Smith, Antony Bexon, Kamaljit Sihra et al., „Guidance on the Calculation, Presentation and Use of Collective Doses for Routine Discharges“, Health Protection Agency UK (HPA), Centre d'Études sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN), im Auftrag der Generaldirektion „Energie und Verkehr“, Direktion H – Nukleare Sicherheit und Sicherheitsüberwachung, TREN.H.4 – Strahlenschutz, Europäische Kommission, *Radiation Protection* 144, 2007.

SPALTMATERIALIEN

Der ursprüngliche Zweck der Wiederaufarbeitung bestand darin, spaltbares Plutonium für Atomwaffen zu erhalten. Dieser Aspekt hat sich im Verlaufe der Jahre verändert, mindestens seit Mitte der 1990er Jahre, als die hauptsächlichsten Atomwaffenstaaten die Abtrennung von Plutonium für militärische Zwecke gestoppt haben. Außerdem hat die UNO-Generalversammlung im Jahre 2017 dem Vertrag zum Verbot von Atomwaffen zugestimmt, einem rechtlich verbindlichen internationalen Vertrag, um Atomwaffen weitestgehend zu verbieten. Länder, die auf eine Wiederaufarbeitung bestehen, sehen sich besonderen Herausforderungen in Bezug auf Proliferation und Sicherheitsrisiken ausgesetzt, wie zum Beispiel der Verwundbarkeit durch terroristische Angriffe.

Im Jahre 2007 hat die hochangesehene Royal Society aus Großbritannien davor gewarnt, dass die potentiellen Folgen eines größeren Sicherheitslecks oder eines Unfalls, bei dem der Lagerbestand von abgetrenntem Plutonium in Großbritannien betroffen ist, „so schwerwiegend sind, dass die Regierung dringend eine Strategie für die langfristige Verwendung oder Lagerung entwickeln und implementieren sollte.“¹²⁶ Im Jahre 2007 betrug dieser Lagerbestand 100 Tonnen. Im Jahre 2017 hatte sich diese Menge auf 140 Tonnen erhöht.¹²⁷ In den vergangenen 10 Jahren haben aufeinanderfolgende britische Regierungen dabei versagt, eine Politik in Bezug auf diese Spaltabfälle zu entwickeln. Japan sieht sich einem ähnlichen Dilemma gegenüber; es existiert ein großer Lagerbestand an abgetrenntem Plutonium, eine im Bau befindliche kommerzielle Wiederaufarbeitungsanlage und nur eine geringe Aufnahmekapazität für Plutonium. Allerdings bleibt Frankreich das einzige Land, welches sich zu einer umfangreichen Wiederaufarbeitung gesetzlich verpflichtet hat.

MISCHOXID-BRENNSTOFF (MOX)

Eine spätere Rechtfertigung für die Wiederaufarbeitung bestand in dem Ziel, das abgetrennte Plutoniumoxid in Plutonium-Uran-Mischoxid-Brennstoff (MOX) zu verwenden; zuerst für die Schnellen-Brüter-Reaktoren (FBR), dann als Ersatz für den Uranbrennstoff für Leichtwasserreaktoren (LWR). FBR-Programme sind in den meisten Ländern beendet worden, und es hat sich herausgestellt, dass MOX-Brennstoff um das Mehrfache teurer ist als Uranbrennstoff, und zwar aufgrund der unabdingbaren zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen. Abgebrannter MOX-Brennstoff wird nirgendwo wiederaufgearbeitet, weil die Plutoniumqualität vermindert und dieser Brennstoff beträchtlich radioaktiver und heißer ist, wenn dieser die Reaktoren verlässt. Im Vergleich zu Uranbrennstoff erfordert MOX entweder zusätzliche Kühlzeiträume bei der Zwischenlagerung von mehr als einem Jahrhundert oder mindestens das Dreifache an Lagerraum in einem Endlager. Dies hat schwerwiegende wirtschaftliche Folgen, weil das Inventar eines Abfallendlagers generell durch die thermische Belastung begrenzt ist.

4.6 RISIKEN IM ZUSAMMENHANG MIT STILLLEGUNG

Sobald ein Atomkraftwerk abgeschaltet ist, muss der abgebrannte Kernbrennstoff entfernt und die Flüssigkeit aus den Kühlsystemen und Moderatoren abgelassen werden. Der Prozess der des Entfernens des Kernbrennstoffs, der Demontage und des Rückbaus eines Atomkraftwerks wird als Stilllegung bezeichnet. Im Jahre 2018 befanden sich 154 Atomreaktoren weltweit im Wartezustand für eine Stilllegung bzw. in den diversen Stadien einer Stilllegung. Weitere 19 Reaktoren waren vollständig stillgelegt, fast alle in den USA (13) und in Deutschland (5). Die durchschnittliche Dauer einer Reaktorstilllegung beträgt unge-

¹²⁶ The Royal Society, „Strategy options for the UK’s separated Plutonium“, Policy document 24/07, September 2007, https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2007/8018.pdf, Stand 29. Mai 2019.

¹²⁷ ONR, „The United Kingdom’s Sixth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and Radioactive Waste Management“, Office for Nuclear Regulation, im Auftrag des BEIS, Oktober 2017, <https://www.gov.uk/government/publications/the-uks-sixth-national-report-on-compliance-with-the-obligations-of-the-joint-convention-on-the-safety-of-spent-fuel-and-radioactive-waste-management>, Stand 25. Mai 2019.

fähr 19 Jahre, in einigen Fällen länger als der Gesamtzeitraum des Baus und des Betriebs des Reaktors.¹²⁸ Ein Reaktor gilt als „Vollständig Stillgelegt“, wenn das Reaktorgebäude vollständig entleert wurde und einer neuen Verwendung zugeführt werden kann oder wenn alle Gebäude entfernt wurden, sich aber die abgebrannten Kernbrennstoffe noch vor Ort befinden. Der Stilllegungsstatus gilt als „Grüne Wiese“, wenn alle Gebäude und Abfälle entfernt worden sind und der Standort uneingeschränkt für andere Zwecke genutzt werden kann. Nur 10 der 19 vollständig stillgelegten Reaktoren haben zum jetzigen Zeitpunkt den Status „Grüne Wiese“ erreicht.

Bei den beiden grundlegenden Strategien für die Stilllegung handelt es sich um dem Direkten Rückbau (Immediate Dismantling) und dem Rückbau nach einer längeren Einschlusszeit (Long-Term Enclosure oder LTE, oder auch Sicherer Einschluss bzw. mit der Bezeichnung „SAFSTOR“ in den USA). Generell ist ein direkter Rückbau vorzuziehen, da man sich die Fertigkeiten und Erfahrungen des Betriebspersonals zunutze machen kann, eine klare Linie an Verantwortlichkeiten weiterhin existiert, ein Interesse der Bevölkerung besteht und die finanziellen Rückstellungen am wahrscheinlichsten die notwendigen Arbeiten abdecken. LTE beinhaltet normalerweise das Risiko, menschliche Kompetenzen, klare Linien der Verantwortlichkeit, die Kontinuität des Unternehmens und das öffentliche Interesse zu verlieren, wodurch sich die Stilllegung über Jahrzehnte hinweg hinzieht.

FORTGESETZTE FREISETZUNGEN VON RADIONUKLIDEN AUS ABGESCHALTETEN REAKTOREN

Es wird eine Vielzahl von Radionukliden nicht nur während des Betriebs der Reaktoren, sondern auch von den abgeschalteten Reaktoren freigesetzt, insbesondere gasförmige Emissionen von Tritium und Kohlenstoff-14. Die Emissionsdaten von Nukliden in der jährlichen Publikation „Radioactivity in Food and the Environment“ (RIFE) der britischen Regierung zeigen, dass die Winfrith-Reaktoren, die im Jahre 1995 abgeschaltet wurden, mehr als 20 Jahre später immer noch zwei Billionen (2×10^{12}) Becquerel Tritium pro Jahr im Jahre 2016 freigesetzt haben.¹²⁹ Ähnliche Muster lassen sich bei den seit vielen Jahren abgeschalteten Reaktoren in Trawsfynydd, Dounreay, Chapelcross und bei allen abgeschalteten Magnox-Reaktoren beobachten. In Kanada wird berichtet, dass die kleinen Versuchsreaktoren in Whiteshell und Rolphton, die vor mehr als 30 Jahren abgeschaltet wurden, jährlich große Mengen an Tritium freisetzen. Die bisher zur Verfügung stehenden Daten betreffen nur die Magnox- und Schwerwasser-Reaktoren. Während des Betriebs dieser Anlagen wurden hohe Konzentrationen von Tritium und C-14 in den Beton- und Stahlstrukturen von Magnox- und HWR-Reaktoren und in deren Umhüllungen absorbiert. Nach der Beendigung der Kernspaltung werden diese Nuklide weiterhin über Jahrzehnte hinweg freigesetzt.

STRAHLENBELASTUNG DURCH STILLLEGUNG VERSUS BETRIEB

Es ist behauptet worden, dass die Strahlenbelastung der Beschäftigten bei der Reaktorstilllegung signifikant sein wird und dass deshalb eine Stilllegung so lange wie möglich hinausgeschoben werden sollte. Allerdings hat die Europäische Kommission berechnet, dass die Dosisreduzierung bei der Abschaltung eines Atomkraftwerks beträchtlich größer ist als die Auswirkungen durch dessen Stilllegung. Die Kommission hat geschätzt, dass die Kollektivdosis von Emissionen in die Atmosphäre während der Stilllegung einer Nuklearanlage in der EU im Jahre 2004 ungefähr 2 Personen-Sv pro Jahr beträgt, verglichen mit ungefähr 150 Personen-Sv pro Jahr bei dem Betrieb jeder Nuklearanlage in der EU.¹³⁰

¹²⁸ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „The World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

¹²⁹ Cefas, „Radioactivity in Food and the Environment 2016“, Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science, im Auftrag der Environment Agency, Food Standards Agency, Food Standards Scotland, Natural Resource Wales, Northern Ireland Environment Agency und die Scottish Environment Protection Agency, RIFE Report 22, Oktober 2017, <https://www.sepa.org.uk/media/328601/rife-22.pdf>, Stand 24. Mai 2019.

¹³⁰ HPA und CEPN, „Radiation Protection 144—Guidance on the calculation, presentation and use of collective doses for routine discharges“, Health Protection Agency und Centre d'Études sur l'Évaluation de la Protection dans le Domaine Nucléaire, im Auftrag der Generaldirektion „Energie und Verkehr“, Direktion H – Nukleare Sicherheit und Sicherheitsüberwachung, TREN.H.4 – Strahlenschutz, Europäische Kommission, 2007.

4.7 ZUSAMMENFASSUNG

Radioaktive Abfälle stellen aus verschiedenen Gründen eine Gesundheitsgefährdung dar. Erstens existieren Auswirkungen auf die Gesundheit durch die routinemäßigen gasförmigen und flüssigen Abfallmissionen aus den Nuklearanlagen. Zweitens sind dies die sehr hohen globalen Kollektivdosen aus der nuklearen Wiederaufarbeitung. Und drittens existieren die unzureichenden und instabilen Bedingungen des Großteils des bereits angefallenen Atommülls. Die hochradioaktiven Abfälle (HLW) in Form der abgebrannten Brennelemente und der verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung enthalten mehr als 90 Prozent der Radioaktivität des gesamten Atommülls. Allerdings gibt es kein vollständig in Betrieb befindliches Endlager für HLW weltweit. Die fortgesetzte Praxis der Lagerung von abgebrannten Brennelementen über lange Zeiträume hinweg in Abklingbecken an den meisten Atomkraftwerken weltweit stellt ein großes Risiko für die Bevölkerung und Umwelt dar. Abgebrannte Brennelemente enthalten den größten Teil der Radioaktivität des Atommülls weltweit und besteht aus Spalt- und Aktivierungsprodukten.

Die Schätzungen der Auswirkungen eines in Betrieb befindlichen HLW-Lagers bleiben spekulativ, weil HLW weiterhin Schlüsselfragen der Verantwortung und Gerechtigkeit über Generationen hinweg aufwirft. Die extrem langen Zeiträume – die Halbwertszeit von Pu-239 beträgt mehr als 24.000 Jahre – sind weiterhin der wichtigste Faktor zur Unterscheidung von radioaktiven Abfällen zu anderen Arten von Abfall.

Die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen erzeugt weitere zugängliche Formen von hochgefährlichen radioaktiven Abfällen, Proliferationsprobleme, hohe Expositionsraten für Beschäftigte und die allgemeine Bevölkerung und eine radioaktive Kontamination der Luft und der Meere.

Nur wenige Länder veröffentlichen Informationen, zum Beispiel in Bezug auf die Nuklidinventare in Abfällen. Eine solche Datensammlung und –verbreitung liegen primär in der Verantwortung der nationalen Regierungen. Die Daten sind erforderlich, um die Risiken von radioaktiven Abfällen ordnungsgemäß abzuschätzen und um Risikoabstufungen zu entwickeln, die die beobachteten Gesundheitsauswirkungen zu den Expositionen in Relation setzen. Bis jetzt existiert kein umfassendes Gefährdungsschema für Radionuklide in Atomabfällen.

Risiken können aus epidemiologischen Studien abgeleitet werden, aber die wenigen Studien, die existieren, sind von begrenzter Qualität. Einige Studien gehen zum Beispiel von erhöhten Krebsraten aus, aber diese Studien sind, einzeln gesehen, zu klein, um statistisch signifikante Ergebnisse zu produzieren. Metaanalysen könnten kleinere Studien zusammenfassen, um größere Datensätze zu generieren, die statistisch signifikante Ergebnisse produzieren könnten. Allerdings zeichnen sich Metaanalysen in Bezug auf radioaktive Abfälle dadurch aus, dass sie praktisch nicht existieren. Das Resultat ist, dass viele kleine Studien weiterhin kritisiert werden, weil sie keine statistische Signifikanz aufweisen.

Schließlich ist es auch erforderlich, genaue Dosen vorhanden zu haben, um die Risiken einzuschätzen, aber diese werden oft in epidemiologischen Studien nicht gemessen. Selbst wenn diese existieren, können diese oft aufgrund der großen Unwägbarkeiten in deren Umfeld unzuverlässig sein.



5. MANAGEMENT-KONZEPTE FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

5.1 HISTORISCHER HINTERGRUND

Das Management von radioaktiven Abfällen über die vergangenen siebeneinhalb Jahrzehnte hinweg erfordert eine kurze historische Einführung. Die Atomtechnologie ist ein Kriegskind¹³¹ und das Ergebnis des andauernden Konflikts zwischen dem Westen und den Ostblockstaaten.¹³² Erst das durch den US-amerikanischen Präsidenten Dwight Eisenhower bei der UN-Generalversammlung am 8. Dezember 1953 angekündigte Programm „Atoms for Peace“ ebnete den Weg für die Verwendung von Atomenergie zur Energieerzeugung.¹³³ Aber die beiden Programme blieben von Anfang an „Siamesische Zwillinge“, erklärte der zu dem Zeitpunkt als Vorsitzender der US-amerikanischen Atomenergiebehörde (AEC – US Atomic Energy Commission) fungierende Gordon Dean im Jahre 1950.¹³⁴ Unter den zu dem Zeitpunkt vorherrschenden Nachkriegsbedingungen, wurde der in erster Linie in den militärischen Produktionsanlagen angefallende radioaktive Abfall annähernd kostenlos in die Umgebung transferiert.¹³⁵ Die zu dem Zeitpunkt herrschende Entsorgungspraxis beinhaltete die direkte Ableitung des Kühlwassers aus den militärisch genutzten Reaktoren in den Columbia River,¹³⁶ das Vergraben von festem und die Versickerung von flüssigem schwach- und mittel-radioaktivem und selbst aus verdünntem hochradioaktivem Abfall auf den Geländen der Forschungseinrichtungen des Militärs,¹³⁷ das Verklappen von festen Abfällen im Meer,¹³⁸ wie im Falle von Farallon Island, westlich von San Francisco,¹³⁹ oder die Ableitung von radioaktiven Abwässern aus der Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield in die Irische See.¹⁴⁰

Ab den 1950er Jahren wurde diese Praxis korrigiert, und die ersten ordnungsgemäßen Programmideen für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen wurden definiert. Die Risiken der Verdünnung von radioaktiven Abfällen in Wasser wurden jetzt offen angesprochen. Der Einschluss von radioaktiven Substanzen wurde zum Ende des Jahrhunderts in Anbetracht des erwarteten starken Anwachsens von radioaktiven Abfällen als zwangsläufig erachtet: „Selbst wenn man die Probleme des unangemessenen Vermischens und der Konzentrationserhöhung in der Tier- und Pflanzenwelt der Meere ignoriert, ist es klar, dass die alleinige Verdünnung nicht die langfristige Antwort auf das Problem der Lagerung von Atommüll sein kann. Selbst die Ozeane sind nicht groß genug, um die Menge an Aktivität einzuschließen, die wahrscheinlich produziert wird. Man wird also dazu gezwungen, sich irgendeiner Art des

¹³¹ Richard Rhodes, „The Making of the Atomic Bomb“, *Simon & Schuster*, 1986.

¹³² Bernd Stöver, „Der kalte Krieg, Geschichte eines radikalen Zeitalters, 1947-1991“, C.-H. Beck, 2017.

¹³³ John Krige, „Techno-Utopian Dreams, Techno-Political Realities: The Education of Desire for the Peaceful Atom“, in Michael D. Gordin, Helen Tilley und Gyan Prakash, „Utopia/Dystopia: Conditions of Historical Possibility“, 2010, *Princeton University Press*, S. 151-175.

¹³⁴ G. Dean, „Problems of the Atomic Energy Commission“, *Nucleonics*, Vol. 6(5), Mai 1950, S. 5-10.

¹³⁵ J. F. Honstead et al., „Movement of Radioactive Effluents in Natural Waters at Hanford“, in IAEAO, „Disposal of Radioactive Wastes“, Konferenzverfahren, Monaco, 16.-21. November 1959, Band 2.

¹³⁶ D. W. Pearce, C. E. Linderoth et al., „A review of radioactive waste disposal to the ground at Hanford“, S. 347-363, in IAEAO, „Disposal of Radioactive Wastes“, Konferenzverfahren, Monaco, 16.-21. November 1959, Band 2.

¹³⁷ *Ibidem*, S. 347-363.

¹³⁸ K. G. Scott, „Radioactive waste disposal; how will it affect man's economy?“, *Nucleonics*, Vol. 6:1, Januar 1950, S. 18-25.

¹³⁹ D. G. Jones et al., „Measurement Of Seafloor Radioactivity at the Farallon Islands Radioactive Waste Dump Site, California“, Open-File Report 01-62, US geologische Untersuchungsbehörde (USGS), Britische geologische Untersuchungsbehörde (BGS), US Umweltschutzbehörde (EPA), US-Nationale Ozean- und Atmosphärenbehörde (NOAA), 2001, <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-062/>, Stand 31. Juli 2019.

¹⁴⁰ D. R. R. Fair und A. S. McLean, „The discharge of radioactive waste products in the Irish Sea-Part. 3: The experimental discharge of radioactive effluents“, Verfahren der Ersten Genfer Atomkonferenz, 8.-10. August 1955, Band IX, 1956.

Sicherheitseinschlusses zuzuwenden.¹⁴¹ Die Suche nach Techniken zum Sicherheitseinschluss und nach Entsorgungsoptionen wurde intensiviert. Es wurden die ersten Vorschläge zur Einlagerung oder zum Schmelzen von Atommüll in Beton,¹⁴² Glas oder keramischen Grundmassen¹⁴³ und deren unterirdischer Endlagerung¹⁴⁴ in Wüstengebieten¹⁴⁵ oder in aufgegebenen Bergwerken oder Tiefbrunnen gemacht.¹⁴⁶ Diese Vorschläge wurden über die Jahre hinweg zu konkreten Bedingungen umformuliert, obwohl eine entsprechende Implementierung noch immer auf sich warten lässt.

In den späten 1940er Jahren haben die AEC und die diversen involvierten Labore die Frage der Endlagerung in Expertengesprächen aufgeworfen.¹⁴⁷ Die Zusammenarbeit mit Experten, Universitäten und Industrie wurde ab den 1950er Jahren zunehmend institutionalisierter. Im September 1955 fand ein Treffen zu den Fragen der Zwischenlagerung und Endlagerung an der Princeton University statt¹⁴⁸; hierauf folgten diverse Treffen zum weiteren Gedankenaustausch¹⁴⁹, teilweise im Zusammenhang mit den internationalen Konferenzen, die mit Beginn in August 1955 unter der Schirmherrschaft der Vereinten Nationen stattfanden.¹⁵⁰ Ab dem Jahr 1955 hat die AEC außerdem die American National Academy of Sciences (NAS) herangezogen, die 1957 einen viel beachteten Bericht über die Entsorgung von radioaktiven Abfällen veröffentlicht hat, der den momentanen Wissensstand und die momentanen Entsorgungsstrategien darstellte.¹⁵¹ Dieser Bericht beschreibt Bergwerke als besonders interessante Endlagerstätten und Salzstöcke als besonders geeignete Wirtsgesteine. Parallel hierzu hat die NAS einen zweiten Bericht ihres Ausschusses „Zu den Auswirkungen von atomarer Strahlung auf die Ozeanographie und die Fischerei“ veröffentlicht, der ein bestimmtes Maß an Vorsicht bei der Verfolgung der Strategie der Endlagerung von Atommüll in den Meeren signalisiert hat.¹⁵²

Die ersten spezifischen Forschungsprojekte in außer Betrieb befindlichen Salzbergwerken begannen in den USA.¹⁵³ Diese Forschungsarbeiten wurden in der Carey Salt Mine in Hutchinson, Kansas, durchgeführt, wo Feldexperimente mit kleinen Mengen hochradioaktiven Abfällen bereits Ende der 1950er Jahre durchgeführt wurden.¹⁵⁴ Diese Experimente dienten dazu, die Temperaturentwicklung in den Salzkavernen und in dem gelagerten Abfall sowie die Reaktionen zwischen Abfall und Salz zu verstehen. Ende der 1960er Jahre hat das Oak Ridge National Laboratory (ORNL), die unterstützende Organisation

¹⁴¹ W. A. Rodger, „Radioactive Wastes – Treatment, Use, Disposal, Chemical Engineering Progress“, *Nuclear Engineering*, Vol. 50(5), Januar 1954, S. 263-266.

¹⁴² L. P. Hatch, „Ultimate disposal of Radioactive Waste“, *American Scientist*, Vol 41(3), 1953, S. 410-421.

¹⁴³ A.C. Herrington, R.G. Shaver und C.W. Sorenson, „Permanent Disposal of Radioactive Wastes, Economic Evaluation“, *Nucleonics*, Vol. 11(9), September 1953, S. 34-37.

¹⁴⁴ Roy J. Morton und Edward G. Struxness, „Ground Disposal of Radioactive Wastes“, *American Journal of Public Health*, Februar 1956, S. 156-163.

¹⁴⁵ Eugen Glueckauf, „The Long-Term Aspects of Fission Product Disposal“, *Atomics*, 1955, S. 274.

¹⁴⁶ Charles V. Theis, „Problems of ground disposal of nuclear wastes“, Verfahren der Ersten Genfer Atomkonferenz, 8.-20. August 1955, Band IX, 1956, S. 774-779.

¹⁴⁷ *Nucleonics*, „Waste Disposal Symposium“, März 1949, Vol. 4(3), S. 9-23.

¹⁴⁸ Committee on Waste Disposal, „The Disposal of Radioactive Wastes on Land“, Division of the Earth Sciences, National Research Council, US National Academy of Sciences, 1957; S.2 und Anhang B, S. 12-81.

¹⁴⁹ Luther J. Carter, „Nuclear imperatives and public trust: Dealing with radioactive waste“, *Issues in Science and Technology*, Vol 3(2), 1987, S. 46-61.

¹⁵⁰ Vereinte Nationen, Verfahren der Ersten Genfer Atomkonferenz, 8.-20. August 1955, 1956.

¹⁵¹ Committee on Waste Disposal, „The Disposal of Radioactive Wastes on Land“, Division of the Earth Sciences, National Research Council, NAS, 1957, S. 8.

¹⁵² Committee on the Effects of Atomic Radiation on Oceanography and Fisheries, „Considerations on the Disposal of Radioactive Wastes from Nuclear-Powered Ships into The Marine Environment“, U.S. National Academy of Sciences, National Research Council, Publication 658, 1959.

¹⁵³ F.L. Parker, et al., „Disposal of Radioactive Wastes in Natural Salt“, in IAEO, „Disposal of Radioactive Wastes“, Band 2, Konferenzverfahren, Monaco, 16.-21. November 1959, S. 368-384.

¹⁵⁴ Zweimal 25 Gallonen von neutralisiertem bzw. synthetischem PUREX-Abfall (PUREX = Plutonium Uran Redox Extraktion); siehe F.L. Parker, et al., „Disposal of Radioactive Wastes in Natural Salt“, IAEO, 1959, S. 377-381.

dieser Experimente, das Bergwerk als ein Endlager vorgeschlagen.¹⁵⁵ Während der nächsten Jahre entwickelte sich ein schwerwiegender Konflikt zwischen dem ORNL und den Bundesbehörden – auf der einen – und dem betroffenen Bundesstaat Kansas – auf der anderen Seite. Das Projekt wurde letztendlich aufgegeben, nachdem ein Geologe 29 frühere Gas- und Ölbohrungen in dem Bereich des Bergwerks entdeckt hatte und sich die hydraulischen Risiken manifestierten.¹⁵⁶ Darüber hinaus gab es erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf „die Lösung Bergwerk“ in einem benachbarten Bergwerk sowie in Bezug auf das Risiko eines Bergwerkseinbruchs in der Nähe des geplanten Endlagers.¹⁵⁷

Das Lyons Projekt in Kansas wurde der erste große Fehlschlag bei der Endlagerung in tiefen geologischen Schichten und hat zum ersten Mal die Probleme der Planung und Steuerung solcher Projekte aufgedeckt. Alle bis zum heutigen Tage geplanten und implementierten Projekte sehen sich diesen beiden fundamentalen Problemen gegenüber: die Unterschätzung der Komplexität der Planung und die Schwierigkeiten bei der Steuerung von Megaprojekten.¹⁵⁸ Das Lyons Projekt ist darüber hinaus interessant, weil dieses Projekt die Möglichkeit der Rückholung von gelagertem Müll zu einem sehr frühen Stadium in Betracht gezogen hat.¹⁵⁹

Alle bis zum heutigen Tage geplanten und verfolgten Projekte sehen sich diesen beiden fundamentalen Problemen gegenüber: die Unterschätzung der Komplexität der Planung und die Schwierigkeiten bei der Steuerung von Megaprojekten.

In den 1960er Jahren hat die Bundesrepublik Deutschland damit begonnen, frühere Salzstöcke als potentielle Standorte in Betracht zu ziehen, wobei den Empfehlungen der NAS gefolgt wurde.¹⁶⁰ Deutschland verfügt über ausgedehnte Salzstöcke und hatte zu dem Zeitpunkt ungefähr 150 Jahre Erfahrung bei dem Betrieb von Steinsalz- und Kalibergwerken. Darüber hinaus betrachteten westdeutsche Geologen und Bergwerksingenieure Salz als „de facto“ trocken (trotz früherer gegenteiliger Erfahrungen).¹⁶¹ Die Entwicklungen in dem Forschungsendlagerbergwerk Asse II in Wolfenbüttel, Niedersachsen, erwiesen sich als so vielversprechend, dass diese zu dem Zeitpunkt in den Publikationen der IAEA¹⁶² und in den Veröffentlichungen der für das Management radioaktiver Abfälle zuständigen Bundesbehörden, als das tiefengeologische Endlagermodell der Zukunft vorgestellt wurden.¹⁶³

¹⁵⁵ J. Samuel Walker, „The Road to Yucca Mountain“, *University of California Press*, 2009, S. 51-75.

¹⁵⁶ William M. Alley und Rosemarie Alley, „Too Hot To Touch. The Problem of High-Level Nuclear Waste“, *Cambridge University Press*, 2013, S. 15.

¹⁵⁷ Phillip M. Boffey, „The Brain Bank of America“, *McGraw Hill*, 1975, S. 104-105.

¹⁵⁸ Graeme Hodge und Carsten Greve, „Public-private Partnership in Developing and Governing Mega-projects“, in Hugo Priemus und Bert van Wee, „International Handbook on Mega-Projects“, *Edward Elgar Edts*, 2013, S. 182-208.

¹⁵⁹ F.L. Parker et al., „Disposal of Radioactive Wastes in Natural Salt“, *IAEO*, 1959, S. 371.

¹⁶⁰ Joachim Radkau, „Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945–1970“, *Rowohlt Taschenbuch*, 1983; und Detlev Möller, „Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland“, *Peter Lang*, 2007.

¹⁶¹ Marcos Buser und Walter Wildi, „Du stockage de déchets toxiques dans des dépôts géologiques profonds“, *Sciences & Pseudosciences*, Juni 2018, <https://www.pseudo-sciences.org/Du-stockage-des-dechets-toxiques-dans-des-depots-geologiques-profonds>, Stand 31. Juli 2019

¹⁶² IAEA, „Radioaktive Abfälle: Woher – Wohin?“, März 1977.

¹⁶³ VSE, GKBP, NAGRA, UeW, „Die nukleare Entsorgung in der Schweiz“, Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, Gruppe der Kernkraftwerksbetreiber und -projektanten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Konferenz der Überlandwerke, 9. Februar 1978.

Mit den Wassereinbrüchen, die ab dem Jahre 1988 aufgezeichnet und im Jahre 2008 öffentlich bekannt wurden, kam das Asse II Projekt, durchgängig charakterisiert durch Geheimhaltung und Missmanagement, zu einem unrühmlichen Ende (siehe Kapitel 7.3).¹⁶⁴

In der Zwischenzeit wurden weiterhin Entsorgungsmethoden durchgeführt, die in erster Linie darin bestanden, festen Atommüll und flüssige radioaktive Stoffe zu minimalen Kosten verdünnt ins Meer oder Grundwasser zu leiten. Dies beinhaltete Verklappungen in den verschiedenen Weltmeeren, wobei sich hieran alle großen Atomwaffenstaaten beteiligten und was außerdem zu dem Entsorgungsmodell von Atommüll aus ziviler Produktion diverser europäischer Länder wurde.¹⁶⁵ Darüber hinaus wurde Atommüll durch die Injektion von flüssigem radioaktivem Abfall mit verschiedenen Aktivitätsraten in alte Explorationsbrunnen entsorgt; dies wurde in den USA und in der Sowjetunion (später Russland) über Jahre und sogar Jahrzehnte hinweg praktiziert.¹⁶⁶

Ab den 1970er Jahren wurden Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Entsorgung von radioaktiven Abfällen erheblich intensiviert. Die Managementstrukturen wurden grundsätzlich neu geordnet (wie im Falle des US-amerikanischen Energieministeriums) und die Konzepte für eine Endlagerung wurden weiterentwickelt. Die exotischen Konzepte wurden eins nach dem anderen fallengelassen, von dem Einlagern von Behältern in den antarktischen Eiskappen¹⁶⁷, über die Endlagerung im Weltall¹⁶⁸ bis zu Schmelzen von Atommüll in thermonuklear geschaffenen Kavernen (DUMP-Projekt).¹⁶⁹ Zu dem Zeitpunkt wurden entweder internationale Projekte, wie das Endlagerprojekt unter dem Meeresboden, das die Einlagerung von hochaktiven Atommüllbehältern in die Tiefseesedimente untersuchte¹⁷⁰ oder Endlagerprojekte im Festlandsockel verfolgt. Die Möglichkeit der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in tiefen Bohrlöchern, die bereits 1957 in dem NAS-Bericht¹⁷¹ in Betracht gezogen wurde, wurde verstärkt in den Hintergrund geschoben. Allerdings wird dieses Verfahren heutzutage noch immer als eine mögliche Option diskutiert.¹⁷²

Der Fokus verblieb auf der tiefengeologischen Endlagerung in speziell ausgelegten Bergwerken in Tiefen von mehreren Hundert (bis zu eintausend) Metern; dies war im Wesentlichen durch die zu dem

¹⁶⁴ Detlev Möller, „Zur Geschichte des Endlagers Asse II [1964-2009] und ihrer heutigen Relevanz“, in Peter Hocke et al., „Rückholung der Nuklearabfälle aus dem früheren Forschungsbergwerk Asse II bei Wolfenbüttel“, Karlsruher Institut für Technologie, KIT *Scientific Working Papers* 47, Vortragsreihe am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), 1. Dezember 2015, S. 9–24, <http://www.itsa.kit.edu/pub/v/2016/houal6a.pdf>, Stand 31. Juli 2019.

¹⁶⁵ Dominique P. Calmet, „Ocean Disposal of Radioactive Waste: A Status Report“, IAEA-Bulletin 4/1989, 1989, S. 47-50, <https://www.iaea.org/sites/default/files/31404684750.pdf>, Stand 2. August 2019; und IAEA, „Inventory of radioactive waste disposals at sea“, IAEA-TECDOC-1105, August 1999, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1105_prn.pdf, Stand 2. August 2019.

¹⁶⁶ NDC, „Radioactive Waste Disposal, Low- and High-Level“, *Pollution Technology Review*, Vol. 38, 1. Januar 1977; und V.I. Spitsyn und V.D. Balukoda, „The Scientific Basis For, and Experience With, Underground Storage of Liquid Radioactive Wastes in the USSR“, Institute of Physical Chemistry, Academy of Sciences of the USSR, in „Scientific Basis for Nuclear Waste Management“, Springer, 1978, S. 237-248.

¹⁶⁷ Bernhard Philbert, „Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen in den Eiskappen der Erde“, *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, Band 23, März 1961.

¹⁶⁸ R.E. Burns et al., „Nuclear Waste Disposal in Space“, Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, NASA Technical Paper 1225, Mai 1978, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19780015628.pdf>, Stand 31. Juli 2019.

¹⁶⁹ A. G. Milnes, „Geology and Radwaste“, London Academic press, 1985, S. 46-48.

¹⁷⁰ Eine Endlagerung unter dem Meeresgrund ist gemäß dem Protokoll von 1996 zu der ‚London Dumping Convention‘ von 1972 verboten; siehe Mark Holt, „Nuclear Waste Disposal: Alternatives to Yucca Mountain“, Congressional Research Service, CRS-Bericht für den US-Kongress, R40202, 6. Februar 2009.

¹⁷¹ Committee on Waste Disposal, „The Disposal of Radioactive Wastes on Land“, Division of the Earth Sciences, National Research Council, NAS, 1957

¹⁷² Franklin W. Schwartz, Yongje Kim, Byung-Gon Chae, „Deep Borehole Disposal of Nuclear Wastes: Opportunities and Challenges“, *Journal of Nuclear Fuel Cycle Waste Technologies*, Vol 15(4), Dezember 2017, S. 301-312.

Zeitpunkt existierenden Konstruktionstechniken bestimmt. Mit dem schwedischen KBS-Projekt zu der Endlagerung von verglastem hochradioaktivem Atommüll und abgebrannten Brennelementen wurde Ende der 1970er Jahre ein neuer Qualitätsstandard gesetzt.¹⁷³ Der schwedische Ansatz basiert auf dem sogenannten Multibarrierenkonzept, bei dem es sich um den derzeitigen Planungsstandard handelte. Diverse ineinander verschachtelte Barrieren gemäß dem Prinzip der „Russischen Puppen“ sollen den Einschluss des radioaktiven Materials über lange Einlagerungszeiträume von Hunderttausenden Jahren sicherstellen. Die Barrieren beinhalten die Verfestigung des Atommülls in einer auslaugungsbeständigen Masse (Borosilikatglas, Keramikmaterialien etc.), wobei die Verpackung aus speziellen Lagerbehältern aus Stahl oder/und Kupfer besteht, und die Einkapselung aus aufquellenden Vulkanaschen („Bentonit“) und Puffermaterialien in den Einlagerungskammern und die Einlagerung in Festgestein in einer günstigen geologischen Umgebung.¹⁷⁴

Der Bau von zukünftigen Endlagern ist mit Einlagerungskammern geplant, von denen einige mehrere Kilometer lang sind, in denen der verpackte Atommüll vertikal oder horizontal eingelagert wird, wobei diese Kammern über Schächte und – in einigen Fällen – über Transportrampen verbunden sind. Von diesem Zeitpunkt an basierten alle Endlagerkonzepte weltweit in den vergangenen vier Jahrzehnten auf diesem Konzept. Im Gegensatz hierzu wurden die Strategien einer Endlagerung in Sedimenten oder im Tiefseegrund aufgegeben. Forschungen zur Endlagerung in kilometertiefen Bohrlöchern werden nur vereinzelt durchgeführt.

Eine Anzahl der Fälle zeigt, dass selbst alle diese Innovationen nicht die sichere Implementierung von Atommüllentsorgung in kontinentalen Endlagern garantieren können. Zum Beispiel haben sich bei dem Waste Isolation Pilot Plant, oder WIPP-Endlagerprojekt in New Mexico, das auf der Grundlage der vorstehend genannten Planungsgrundsätze implementiert wurde, diverse kleinere oder schwerwiegendere Ereignisse und Unfälle zwischen 2014 und 2017 ereignet.¹⁷⁵ Dies enthüllt eine weitere Risikodimension bei der konkreten Realisierung von Endlagern: zusätzlich zu den technischen und geologischen Sicherheitsproblemen ergeben sich grundsätzliche Fragen in Bezug auf strukturelle und organisatorische Defizite, insbesondere in den Bereichen Qualitätssicherung, Sicherheitskultur und Steuerung von Endlagerprogrammen.¹⁷⁶

Das schweizerische Endlagerkonzept der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) hat sich diesen Fragen zur Jahrtausendwende zugewandt.¹⁷⁷ Die EKRA hat sich, wie keine andere Kommission zuvor, mit allen möglichen Optionen zur Lagerung und Endlagerung von radioaktiven Abfällen befasst. Das EKRA-Konzept hat fundamentale Innovationen bei der Planung und Durchführung von Endlagerungsprojekten in tiefegeologischen Endlagern aufgeführt. Diese beinhalteten die Unterscheidung zwischen aktiven Maßnahmenprogrammen und passiven Sicherheitssystemen und der Notwendigkeit für die systematische Durchführung der Programme. Dies beinhaltete darüber hinaus Konzepte für die langfristige Überwachung von Endlagern, wie dies durch einige vorherige Autoren bereits gefordert worden war.¹⁷⁸ Die Durchführbarkeit sollte über ein Forschungsendlager und entsprechende

¹⁷³ KBS, „Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste“, 1978, Stockholm; und KBS, „Handling and Final Storage of Unreprocessed Spent Nuclear Fuel“, 1978, Stockholm.

¹⁷⁴ A. Geoff Milnes, Marcos Buser und Walter Wildi, „Endlagerungskonzepte im Überblick“, *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, Vol. 131(2), 1980, S. 359-385.

¹⁷⁵ David M. Klaus, „What really went wrong at WIPP: An insider’s view on two accidents at the only underground nuclear waste repository“, *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 75(4), 2019, S. 197-204.

¹⁷⁶ Marcos Buser, „Wohin mit dem Atommüll?“, *Rotpunkt*, 2019, S. 204-206.

¹⁷⁷ EKRA, „Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle“, Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle, Schlussbericht, 31 Januar 2000, Bundesamt für Energie, Bern.

¹⁷⁸ R. Philip Hammond, „Views: Nuclear Wastes and Public Acceptance: Monitored containers in a controlled tunnel environment may prove more widely acceptable than the uncertainties of an uncontrolled geologic structure“, *American Scientist*, Vol. 67, No. 2, März-April 1979, S. 146-150; und Eugene H. Roseboom, Jr., „Disposal of High-Level Nuclear Waste Above the Water Table in Arid Regions“, Nr. USGS-CIRC--903, Geological Survey Circular 903, U.S. Department of the Interior, 1983, Alexandria, VA (USA).

Überwachungsprogramme bewiesen werden. Andere grundlegende Elemente betrafen das Prinzip der Reversibilität von Entscheidungen und der Rückholbarkeit von eingelagertem Atommüll, aber außerdem die Organisation des Programms, die strukturellen Rahmenbedingungen und die darin eingebettete Prozessführung, Qualitätssicherungsprogramme oder eine langfristig orientierte Forschungspolitik. Das EKRA-Konzept bildete die Grundlage für das Atomenergiegesetz von 2003. Das Programm und das Gesetz der Schweiz ging deshalb weit über das hinaus, was Frankreich zuvor mit dem Atommüllgesetz („Loi Bataille“)¹⁷⁹ und die festgelegte Verpflichtung zur Untersuchung der Reversibilitätsoptionen angekündigt hatte.¹⁸⁰

Die Anforderungen an die Steuerung von Management-Konzepten für radioaktive Abfälle sind heutzutage zunehmend Gegenstand von Klärung und Regulierung, wie die Beispiele der französischen Praxis¹⁸¹ oder des Deutschen Standortauswahlgesetzes (StandAG) zeigen. Das Letztgenannte versteht das Standortauswahlverfahren als ein „lernendes System“, das „(...) in der Lage [ist], neue im Verfahrensverlauf entstehende Erkenntnisse und Einflüsse zu berücksichtigen sowie diese gegebenenfalls in den Prozess zu integrieren und umzusetzen.“¹⁸² In Forschung und Praxis wurden Fragen der Steuerung in zunehmenden Maße berücksichtigt.¹⁸³

Ein kurzer Überblick über die mehr als 70-jährige Geschichte des Managements von radioaktiven Abfällen erlaubt vier Schlussfolgerungen in Bezug auf Programm-Management und den Erfolg oder das Scheitern von vorherigen Projekten:

- Es wurde bis zum heutigen Tage weltweit kein einziges Programm zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Schichten erfolgreich durchgeführt.
- Die Komplexität und die Risiken des Managements von radioaktiven Abfällen werden massiv unterschätzt.
- Die Geschichte des Managements von radioaktiven Abfällen zeigt einen ständigen Wechsel bei den Konzepten und Programmen in Bezug auf Zielsetzungen, Implementierung, Sicherheit und Planung von Maßnahmen in Richtung auf besser handhabbare langfristige Projekte (Steuerung und langfristige Verantwortung).
- Die Geschichte des Managements von radioaktiven Abfällen hat offengelegt, dass die ausschließlich wissenschaftliche und technische Handhabung solcher Programme nicht in der Lage ist, den Herausforderungen zu begegnen, die von einem solchen Hochrisikoprogramm ausgehen. Fragen, wie die Steuerung eines Projekts, die Ko-Konstruktion von Management- und Endlagerungsstrategien und die Rolle der betroffenen Gemeinden, wurden in der Vergangenheit häufig von den Regierungen vernachlässigt.

¹⁷⁹ Französische Regierung, „Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs“, 1991.

¹⁸⁰ Markku Lehtonen, „Opening Up or Closing Down Radioactive Waste Management Policy? Debates on Reversibility and Retrievability in Finland, France, and the United Kingdom“, *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, Vol. 1(4), November 2010.

¹⁸¹ Pascal Leverd, „La réversibilité dans le projet de stockage profond“, *Science & Pseudoscience*, Nr. 324, April-Juni 2018, <https://www.afis.org/La-reversibilite-dans-le-projet-de-stockage-profond>, Stand 31. Juli 2019.

¹⁸² Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, „Aspekte eines Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle“, Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung Broschüre, Oktober 2014, S. 13, https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/352790/fbe1c31a22e4ca2c30345c46bc36bed0/drs_081-data.pdf, Stand 31. Juli 2019.

¹⁸³ Achim Brunnengräber, Maria Rosaria Di Nucci et al, „Nuclear Waste Governance—An International Comparison“, *Springer VS*, 2015; und Sophie Kuppler und Peter Hocke, „The role of long-term planning in nuclear waste governance“, *Journal of Risk Research*, 2018, S. 1–14.

5.2 DER KONTEXT DES MANagements VON RADIOAKTIVEN ABFÄLLEN

Die Erfahrungen aus der Vergangenheit legen nahe, dass fünf grundlegende Dimensionen bei der Weiterführung und Entwicklung von -Management-Konzepten für radioaktive Abfälle berücksichtigt werden sollten:

HISTORISCHER RAHMEN: Gesellschaften werden mit den bisherigen radioaktiven Hinterlassenschaften und mit dem wahrscheinlich verbleibenden Vermächtnis leben müssen. Diese Aufgabe stellt eine besondere soziale, technische, politische und finanzielle Herausforderung für zukünftige Generationen dar. Die vorgesehenen Kosten in Höhe von US\$ 490 Milliarden (€ 438 Milliarden), die für die Sanierung der atomar verseuchten Standorte in den USA geschätzt werden, zeigt die Größenordnung des Problems.¹⁸⁴ Moderne Gesellschaften werden nicht in der Lage sein, die Übernahme des Atommüllvermögens zu vermeiden und müssen sich dieser Frage mit weitaus vorausschauenderen und sichereren Lösungen als heute widmen. Nichtsdestoweniger sollten Lektionen aus der Geschichte gelernt werden, um vergangene Abfallmanagement Fehler nicht zu wiederholen. Dies bezieht sich auf die in der Forschung und Implementierung von Lösungen initiierten Prozesse und die soziale Kontrolle hierüber. Es impliziert darüber hinaus, dass während der Planung und der Durchführung der Programme eine Sicherheitskultur mit einer ernsthaften Verpflichtung zu „Best Practices“ Anwendung findet.

SOZIALE RAHMENBEDINGUNGEN UND ZEITLICHE ANFORDERUNGEN: Die historischen Beispiele zeigen, dass die zeitlichen Anforderungen an die Durchführung von Entsorgungsprogrammen für radioaktive Abfälle weltweit massiv unterschätzt wurden. Die Endlagerung von radioaktiven Abfällen und die Planung und Durchführung der Strategien für eine heutzutage in Betracht gezogene tiefengeologische Endlagerung werden sich über mindestens drei weitere Generationen erstrecken. Wenn man die Anforderungen an Überwachung und langfristige Überwachung der beabsichtigten „Endlager“ in Betracht zieht, kann man durchaus von Zeiträumen von fünf bis zu zehn Generationen (150 bis 300 Jahre) ausgehen. Diese langen Zeiträume stellen besondere Anforderungen an die Stabilität von Gesellschaften und führen unausweichlich zu Erwägungen, wie der bereits in Zwischenlagereinrichtungen gelagerte radioaktive Abfall über solche Zeiträume hinweg sicher gelagert, gehandhabt und gewartet werden kann. Dies führt außerdem zu besonderen Herausforderungen in Bezug auf die Qualität der Planung, des spezifischen langfristigen Managements und die technische Auslegung solcher langfristiger Zwischenlagereinrichtungen. Es kann außerdem notwendig sein, ausgedehnte unterirdische Lagereinrichtungen für längere Lagerungszeiträume einzurichten.

KOMPLEXITÄT: Die Komplexität der Endlagerung des atomaren Vermächtnisses wird heutzutage immer noch massiv unterschätzt. Das physikalisch-chemische Altern von Atommüll und die daraus resultierenden Risiken sind noch immer weitestgehend unerforscht. In ähnlicher Weise führen die Heterogenität des radioaktiven Inventars und der betreffenden Träger- und Verdichtungsmaterialien zu vollkommen neuen Problemen bei der Einlagerung dieser Abfallmischungen in den unterirdischen Endlagern. Zum Beispiel wurden eine große Anzahl von organischen Substanzen bei den Reinigungs-, Wartungs- oder Verfestigungsprozessen für schwach- und mittlerradioaktivem Abfall verwendet. Bestimmte dieser Mischungen müssen als Zündquellen (z.B. bituminierte Ionenaustauschharze) angesehen werden, und diese stellen eine besondere Gefahrenquelle dar, wenn ein Endlager offen betrieben wird.¹⁸⁵ Darüber hinaus werden organische Abfallstoffe eine entscheidende Rolle bei der Gasbildung in geschlossenen

¹⁸⁴ David M. Klaus, „What really went wrong at WIPP: An insider’s view of two accidents at the only US underground nuclear waste repository“, *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 55(4), 28. Juni 2019, S. 201.

¹⁸⁵ Marcos Buser und Walter Wildi, „Abfallkonditionierung in Bitumen : ASN sagt nein!“, *Nuclear Waste*, 21. Januar 2018, <https://www.nuclearwaste.info/abfallkonditionierung-in-bitumen-asn-sagt-nein/>, Stand 2. August 2019.

unterirdischen Lagereinrichtungen spielen. Die Risiken betreffen nicht nur die geplanten Endlager für hochradioaktiven, sondern auch für solche für schwach- und mittelradioaktiven Abfällen. Feuerrisiken und Feuer sind aus unterirdischen Endlagern für chemisch toxische Abfallstoffe bekannt.¹⁸⁶

Ein weiteres Beispiel für neue, aus Abfallmischungen resultierende Probleme ist die große Menge an gelagerten Materialien, und zwar von radioaktiven Materialien, Metallen und Schwermetallen, organischen Materialien und Abbauprodukten, bis zu korrodierenden Behältermaterialien und Produkten (Alkali-Aggregate-Reaktionen in Beton); diese bilden eine besonders reaktive Umgebung in Kontakt mit Tiefenwasser und Porenwasser¹⁸⁷ oder Laugen der entsprechenden Wirtsgesteine. Das sich hieraus ergebende chemische Milieu eines solchen unterirdischen Atommülllagers ist bis jetzt nur Gegenstand von sehr begrenzten Untersuchungen und Forschungen gewesen und sollte deshalb tiefergehend untersucht werden. Dies bezieht sich auch auf Gasbildung durch bakterielle oder chemische Abbauprozesse.

Die Komplexität der Planung kann durch eine große Anzahl von Fragen illustriert werden, bezüglich derer es heutzutage keine oder eine nur sehr begrenzte Erfahrung gibt. Es werden auch Fragen beantwortet werden müssen, wie z.B. unterirdische Einrichtungen, die sich über viele Quadratkilometer erstrecken, langfristig in einem spannungsempfindlichen Untergrund verhalten und in welchem Ausmaß solche Einrichtungen überhaupt dicht versiegelt werden können. Eine weitere Frage bezieht sich auf die Entwicklung der Brennelemente während des unterirdischen Lagerungsprozesses und deren langfristige Entwicklung und potentielle Auswirkungen auf deren eventuelle Rückholbarkeit. Schließlich können wissenschaftliche Erkenntnisse oder technische Entwicklungen und Entwicklungssprünge grundsätzlich ein geplantes Endlagersystem in Frage stellen, das momentan implementiert wird. Auch in einem solchen Fall sollte Bezug genommen werden auf die vorgenannten Erwägungen bezüglich der Komplexität eines tiefergeologischen Endlagerungssystems. Viele dieser grundlegenden Fragen erfordern eine umfangreiche und dringliche Klärung.

POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN: Diese betreffen die Proliferation von Spaltprodukten und das Anerkennen, dass man ein tiefergeologisches Endlager auch langfristig als ein „Bergwerk für Plutonium und recyclebare Materialien“ ansehen kann. Dies führt selbstverständlich zu weitreichenden Fragen über das Eindringen in die Endlager bzw. den Schutz von solchen Endlagern. In diesem Sinne stellt die Endlagerung von bestrahlten, hochradioaktiven Brennelementen eine besondere Herausforderung bezüglich zukünftiger sozialpolitischer Entscheidungen dar.

STEUERUNG UND GESELLSCHAFT: Schließlich muss man sich zwei weiteren zentralen Faktoren bei Management-Konzepten für radioaktive Abfälle zuwenden. Erstens sind dies Fragen der Steuerung von Programmen, wobei Entscheidungsträger die zentrale Bedeutung dieser Fragen erst langsam begreifen (Beispiele: WIPP in den USA und Asse II in Deutschland), und wobei diese Fragen in Bezug auf eine weitergehende Vertrauensbildung unabdingbar sind. Zweitens können Zivilgesellschaften (insbesondere die betroffenen Regionen) nicht nur im Sinne einer begleitenden Partizipation involviert werden, sondern diese müssen in einem weitergefassten Partizipations- und Mitbestimmungsprozess für die langfristige Akzeptanz solcher Projekte miteinbezogen werden. Diese Erwägungen in Bezug auf den Kontext -Management-Konzepte für radioaktive Abfälle haben Vorrang vor den weiteren Erläuterungen einer tiefergeologischen Endlagerung von Atommüll bzw. der damit verbundenen Notwendigkeit einer Langzeit-Zwischenlagerung, bis eine unterirdische Lösung realisiert werden kann.

¹⁸⁶ COFIL, „Comité de pilotage Stocamine—Rapport d’expertise“, Expertenbericht, Leitungsgremium Stocamine, Juli 2011, <http://www.stocamine.com/media/1061/Conclusions%20COFIL.pdf>, Stand 1. August 2019.

¹⁸⁷ Porenwasser ist Grundwasser oder Tiefenwasser, das in den offenen Zwischenräumen in Sedimenten zwischen Gießen und Mineralien eingelagert ist.

5.3 MANAGEMENT-KONZEPTE FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Jede Management-Lösung für radioaktive Abfälle muss die Bevölkerung und die Umwelt bestmöglich schützen, muss durchführbar und toleriert sein und darf den zukünftigen Generationen keine unangemessenen Probleme aufbürden. Dieses gemeinsame Verständnis der Notwendigkeiten für die Atommüll-lagerung wird in dem Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle von 2001 ausgedrückt. Artikel 11 des Gemeinsamen Übereinkommens führt aus, dass „jede Vertragspartei die angemessenen Schritte unternehmen muss, um zu gewährleisten, dass Personen, Gesellschaft und Umwelt bei allen Schritten des -Managements von radioaktiven Abfällen in angemessener Weise gegen radiologische und andere Risiken geschützt werden.“¹⁸⁸ Der langfristige Schutz eines Endlagers gegen Eindringen muss außerdem garantiert werden. Dieses Ziel stellt aufgrund der enormen Fortschritte bei den heutigen und zukünftigen Bohrtechnologien eine besondere Herausforderung dar. Diese Umkehr und gleichzeitige Erweiterung der Schutzziele müssen zu einem grundlegenden Umdenken der Rollen und Verantwortlichkeiten bei der Planung und Auslegung von Management-Programmen führen. Letztendlich muss außerdem die momentane Vision einer tiefengeologischen Endlagerung ohne eine gesellschaftliche Überwachung ausgeschlossen werden.¹⁸⁹

ENDLAGERKONZEPTE

Die IAEO beschreibt Endlagerung als eine Einlagerung ohne die Intention einer Rückholung (dies bedeutet nicht, dass eine Rückholung nicht möglich ist). Die IAEO unterscheidet bei ihren Sicherheitsanforderungen an Atommüll zwischen:¹⁹⁰

- Endlagerung in speziellen Deponien: ähnlich den konventionellen Deponien, und zwar hier für sehr schwachradioaktivem Atommüll (VLLW), z.B. aus der Stilllegung;
- Oberflächennahe Endlagerung: in konstruierten oberirdischen Gräben oder Gewölben oder in Einlagerungsstätten in Tiefen von mehreren zehn Metern für schwachradioaktiven Atommüll (LLW);
- Unterirdische Lagereinrichtungen: diese bestehen aus konstruierten Kavernen und Gewölben oder sind in Bergwerken untergebracht, die sich in Tiefen von mehreren zehn Metern bis zu Hunderten Metern Tiefe befinden, und zwar für mittelradioaktiven Atommüll (ILW);
- Tiefengeologische Endlagerung: wie vorstehend beschrieben, hauptsächlich abgebrannte Brennelemente und sonstiger hochradioaktiver Atommüll (HLW);
- Endlagerung in Bohrlöchern: mit einer Tiefe von einigen Hundert Metern bis zu einigen Kilometern für HLW-Behälter bzw. für die Endlagerung von Plutonium.¹⁹¹

¹⁸⁸ IAEO, „Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“, 2001, <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/joint-convention-safety-spent-fuel-management-and-safety-radioactive-waste>, Stand 11. Juni 2019.

¹⁸⁹ Marcos Buser, „Nuclear Waste – How to Handle our Legacy to Future Generations: The dual approach“, Vortrag bei dem Internationalen Kongress „Human Rights, Future Generations & Crimes in the Nuclear Age“, Universität Basel, 14.-17. September 2017.

¹⁹⁰ IAEO, „Disposal of Radioactive Waste“, IAEA Safety Standards, Nr. SSR-5, April 2011, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1449_web.pdf, Stand 1. August 2019.

¹⁹¹ NAS, „Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium“, Committee on International Security and Arms Control, U.S. National Academy of Sciences, Washington D.C., 1994, Anhang C, S. 247.

Bei dieser Kategorisierung weist die IAEO bestimmte Atommüllkategorien bestimmten Endlagerkonzepten in einem schrittweisen Ansatz zu. Die Entscheidung über das Endlagersystem liegt bei dem betreffenden Land. Die meisten Länder haben zumindest Endlagerkonzepte und in vielen Ländern befinden sich Endlagerstätten für schwach- und mittelradioaktiven Atommüll in Bau oder in Betrieb (siehe Kapitel 2.3.1).

WIRTSGESTEINE

Wie die historische Analyse zeigt, haben sich die heutigen Endlagerkonzepte relativ spezifisch in Richtung einer Endlagerung von Atommüll in der kontinentalen Erdkruste entwickelt (siehe Kapitel 5.1). Von Beginn an wurden hauptsächlich Salzstöcke, aber auch Montmorillonite, wie Tonminerale und Tongesteine, als besonders interessante Wirtsgesteine angesehen, und zwar aufgrund ihrer sehr niedrigen Durchlässigkeit und ihrer hohen Aufnahmefähigkeit. Die Suche nach Standorten für die Endlagerung von hochradioaktivem Abfall konzentrierte sich speziell auf diese beiden Gesteinsarten. Allerdings mussten die Optionen relativ schnell auf andere Wirtsgesteine ausgeweitet werden, weil einige Länder über keine solche Gesteinsformationen verfügten. Insbesondere die Wahl von kristallinen Gesteinen des Baltischen Schields durch die beiden nordischen Länder, die Atomenergie nutzen (Schweden, Finnland) beruht auf diesem Umstand. Allerdings waren die nordischen Länder insbesondere dazu gezwungen, die künstlichen Barrieren (Kupferbehälter) massiv zulasten der geologischen Isolierung zu verstärken, um den Grundwasserzuflüssen durch das gespaltene und durchlässige kristalline Gestein zu begegnen. Auch Japan hat auf die Gesteinsformationen zurückgegriffen, die sich im Untergrund des Zirkumpazifischen Feuerrings befinden: kristalline Gesteine und pelagische oder hemipelagische Sedimente.¹⁹²

Darüber hinaus existieren weitere andere exotische Gesteinsarten bei den Wirtsgesteinen: vulkanische Tuffgesteine; diese wurden als Lagerstätten geplant, z.B. in erster Linie für Yucca Mountain, Nevada¹⁹³ – den Standort des tiefengeologischen Endlagerprogramms der USA, der mittlerweile aufgegeben werden musste (siehe Kapitel 7.8) – und dies wirft grundsätzliche Fragen der Eignung aufgrund der Durchlässigkeit dieser Gesteinsformationen auf. Gleichermäßen problematisch sind die generell relativ dünnen Schichten von Anhydrid, die als Gesteinsformationen im Zusammenhang mit Steinsalzstöcken vorkommen. Diese waren eine frühe Spezialität der schweizerischen Endlagerprogramme.¹⁹⁴ Weitere Gesteinsarten, die im Zuge der Standortsuche ausgewählt wurden, waren z.B. Basalte in dem Hanford-Programm der USA, die unterhalb der Quartärabdeckung liegen,¹⁹⁵ oder die alpinen Mergelgesteine von Wellenberg in der Schweiz.¹⁹⁶

Historisch gesehen, sind „exotische“ Wirtsgesteine oftmals in der unmittelbaren Nähe von Atomanlagen oder Bergwerken, wie dem Eisenerzbergwerk Schacht Konrad in der Nähe von Salzgitter in Deutschland¹⁹⁷ oder in der Nähe des Uranbergwerks „Beta“ in den Pegmatiten von El Cabril in Spanien¹⁹⁸ auf-

¹⁹² NEA, „Japan’s Siting Process for the Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste—An International Peer Review“, OECD, *Radioactive Waste Management*, 2016, S. 15, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/chiso_shobun/pdf/018_s01_00.pdf, Stand 1. August 2019.

¹⁹³ J. Samuel Walker, „The Road to Yucca Mountain“, *University of California Press*, 2009.

¹⁹⁴ Marcos Buser, „Short-term und Long-term Governance als Spannungsfeld bei der Entsorgung chemo-toxischer Abfälle—Vergleichende Fallstudie zu Entsorgungsprojekten in der Schweiz und Frankreich: DMS St-Ursanne und das Bergwerk Felsenau (beide Schweiz) und Stocamine (Frankreich)“, ITAS-ENTRIA-Arbeitsbericht 2017-02, 2017b, <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2017/buse17a.pdf>, Stand 1. August 2019.

¹⁹⁵ A. G. Milnes, „Geology and Radwaste“, *London Academic press*, 1985, S. 154-155.

¹⁹⁶ Jon Mosar, „Beurteilung der Tektonik im Standortgebiet Wellenberg (Kt. NW/OW) hinsichtlich eines Tiefenlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle“, Sachplan geologische Tiefenlager, Universität Fribourg, z. Hd. Baudirektion Nidwalden, Oktober 2010, S. 4-6, https://www.nw.ch/_docn/30814/gutachten_tektonik_prof._mosar.pdf, Stand 1. August 2019.

¹⁹⁷ PTB, „Schachtanlage Konrad—vom Erzbergwerk zum Endlager für radioaktive Abfälle“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, <https://epic.awi.de/id/eprint/37594/1/schacht-konrad.pdf>, Stand 1. August 2019.

¹⁹⁸ José Luis Hernando-Fernández, „Descubrimiento, explotación y tratamiento de los minerales radioactivos de Sierra Albarrana, El Cabril, Córdoba“, Seminar „A. CARBONELL T-F“, 2002, https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/6947/bracol43_2002_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y, Stand 1. August 2019.

getreten. Unabhängig von der Tatsache, dass es nur begrenzte Erfahrungen bei der Realisierung von tiefeingeologischen Endlagern gibt, werden Salz- und Tongesteine oder kristalline Gesteine normalerweise als besonders geeignete Wirtsgesteinsformationen angesehen.

LILW-ENDLAGER

Die ersten drei Lagertypen, die durch die IAEO aufgeführt sind (Endlagerung in speziellen Deponien, oberflächennahe Endlagerung und unterirdische Einrichtungen), sind über mehrere Jahrzehnte hinweg in vielen Ländern implementiert worden. Allerdings unterscheidet sich die Laufzeit der Implementierungen erheblich und entspricht den zu der Zeit existierenden konzeptionellen Perspektiven und technischen Mitteln. Die in den frühen Jahren eingerichteten Deponien für kommerzielle schwachradioaktive Abfälle in den Vereinigten Staaten, wie Maxey Flats oder West Valley, New York, zeigten relativ schnell, dass Radioaktivität aus den Deponien entwich. Diese Deponien wiesen Leckagen auf, wie dies später durch Überwachungsprogramme an mehreren anderen Standorten bestätigt wurde. In Maxey Flats wurde bereits in den 1970er Jahren bewiesen, dass eingelagertes LILW in großen Mengen ausgewaschen wurde und dass sich außerdem außerhalb der Deponie Plutoniumbestandteile befanden.¹⁹⁹ Bei der Deponie Beatty in Nevada, wo nukleare und chemisch toxische Abfälle in Gräben gelagert wurden, haben sich von Beginn des Betriebs an bis vor kurzem Ereignisse gehäuft, als entsorgtes metallisches Natrium reagierte und teilweise ausgeworfen wurde.²⁰⁰ Viele weitere solcher Deponien haben den gleichen Verlauf genommen, wie man dies der Liste der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde von Superfund-Standorten entnehmen kann. Zusammengefasst kann man sagen, dass konventionelle Deponien und Gräben – die erste dieser Anlagen wurde nach dem zuvor erwähnten IAEO-Bericht benannt – hydraulisch nicht zuverlässig versiegelt werden können. Deswegen müssen diese Anlagen als mehr oder weniger kontrollierte permanente „Verdünnungsanlagen“ betrachtet werden.

Die zweite Art von Endlagerstätten besteht aus der Verstärkung der Schutzfunktionen, die bereits bei der ersten Art von Deponien erreicht wurden, und zwar mit zusätzlicher Hilfe von betonierten Komponenten und Strukturen. Diese Art der Konstruktion trägt vor allem zur Schaffung einer Grundumgebung bei, die eine geochemische Barriere, insbesondere in Bezug auf schwermetallhaltiges Sickerwasser schafft. Diese Auslegung wird sowohl für LLW- als auch für LILW-Standorte verwendet. Eine dieser Anlagen ist die Einrichtung für LLW-Atommüll, die im Jahre 1971 in Barnley, South Carolina, eröffnet wurde; diese war in Form von Gräben ausgelegt, die über eine Tonversiegelung verfügen und in denen der Atommüll in vorgefertigten, konditionierten Betonzylindern gelagert wird.²⁰¹ Weitere Anlagen dieses Typs beinhalten die beiden französischen Standorte „Centre de Stockage de la Manche“ (CSM), Digulleville, Normandie, in Betrieb befindlich zwischen 1969 und 1994²⁰² und die Nachfolgedepoie „Centre de Stockage de l'Aube“ (CSA), Soulaines-Dyus, Aube.²⁰³ Hier wurden die vorkonditionierten unverpackten LILW-Abfälle in den ersten Tagen in Gräben versenkt, bevor diese in technischen Endlagerungs-

¹⁹⁹ Kristin Shrader-Frechette, „Burying Uncertainty—Risk and the Case Against Geological Disposal of Nuclear Waste“, *University of California Press*, Dezember 1993, S. 103-104; und Jess M. Cleveland und Terry F. Rees, „Characterization of Plutonium in Maxey Flats Radioactive Trench Leachates“, *Science*, Vol. 212, Issue 4502, 26. Juni 1981, S. 1506.

²⁰⁰ William M. Alley und Rosemarie Alley, „Too Hot To Touch—The Problem of High-Level Nuclear Waste“, *Cambridge University Press*, 2013, S. 139-148.

²⁰¹ South Carolina Department of Health and Environment Control, „Commercial Low-Level Radioactive Waste Disposal in South Carolina“, Bureau of Land and Waste Management, Division of Waste Management, 2007, https://www.scdhec.gov/sites/default/files/docs/HomeAndEnvironment/Docs/commercial_low_level.pdf, Stand 5. August 2019.

²⁰² IAEO, „Upgrading of Near Surface Repositories for Radioactive Waste“, Technical Report Serie Nr. 433, 2005, S 63-70, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS433_web.pdf, Stand 5. August 2019.

²⁰³ ANDRA, „Rapport Annuel—Centre de stockage de déchets radioactifs de faible et moyenne activité de l'Aube“, Nationale Agentur für das Management radioaktiver Abfälle, Jahresbericht, 2008, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/034/49034330.pdf, Stand 5. August 2019.

kammern aus Beton eingelagert wurden. Die flachen Deponien wurden unter Verwendung von konventionellen Versiegelungstechniken abgedeckt. Die Standorte sind mit Drainage- und entsprechenden Überwachungssystemen ausgestattet. Die LLW-Deponie in Dessel, Region Campine, Belgien, besteht außerdem aus gegossenen monolithischen Betonblöcken.²⁰⁴

Obwohl diese Anlagen besser geschützt sind gegen Eindringen von Wasser als die ursprünglichen Gräben, dringt während der Zeit Regenwasser in die Betonblöcke ein und kann geringe Mengen an löslichen radioaktiven Substanzen (insbesondere Tritium)²⁰⁵ auswaschen. Selbst diese Anlagen funktionieren nicht ohne Verdünnung. Die Anlagen für LILW in El Cabril, Córdoba, Spanien,²⁰⁶ oder diejenige für LLW in Drigg, Cumbria, GB,²⁰⁷ sind unter Verwendung derselben Prinzipien gebaut.²⁰⁸

Im Gegensatz zu vielen HLW-Endlagerprogrammen werden häufig aktive Maßnahmen, wie Planungsqualität, langfristige Überwachung (Hunderte von Jahren) und Wartung der Anlagen, in Falle von LILW-Endlagern als selbstverständlich angesehen.

Unterirdische Anlagen wurden relativ früh in Schweden²⁰⁹ und Finnland²¹⁰ eingerichtet. Beide Endlager enthalten LILW-Atommüll. Es existieren Silos oder Lagerkavernen, in denen die diversen Arten von LILW ungefähr 60 m unter der Erde gelagert sind. Signifikanterweise sind bituminiert Ionenaustauschharze auch in diesen Lagereinrichtungen gelagert. Keine dieser Anlagen verfügt über ein Überwachungssystem (mit Bohrlöchern, einer Probenentnahme für Wasser und Gas außerhalb des Lagerbereichs). Ganz im Gegensatz zu heutigen Deponien für städtische oder sonstige Abfälle. Andere unterirdische Lager verwenden Bergwerke für die Endlagerung von LILW, wie dies bereits in Bezug auf die mittlerweile sanierte Mina Beta in El Cabril erwähnt worden ist. Dies ist auch der Fall in der Tschechischen Republik. Das frühere Kalkbergwerk Richard mit einer Tiefe von 70–90 Metern unter der Erdoberfläche wurde zur Endlagerung von öffentlichen Abfällen umgebaut. Das Endlager Bratrství in einem früheren Uranbergwerk wurde für Abfälle mit natürlich auftretenden Radionukliden verwendet und soll mit Beginn des Jahres 2025 geschlossen werden. Das Hostim-Endlager mit einem Volumen von ungefähr 1.700 m³ in einem aufgegebenen Kalkbergwerk wurde im Jahre 1997 dauerhaft versiegelt.

²⁰⁴ William Wacquier und Wim Cool, „The safety case in support of the license application of the surface repository of low-level waste in Dessel, Belgium“, ONDRAF/NIRAS, Nuclear Energy Agency, NEA/NWR/R(2013)9, 2013.

²⁰⁵ IAEA 2005, S. 65.

²⁰⁶ Pablo Zuloaga, Andrés Guerra-Librero und A. Morales, „L/ILW Disposal Experience in Spain After the Startup of El Cabril Disposal Facility“, ENRESA, IAEA-SM-341/49, in IAEO, „Planning and Operation of Low Level Waste Disposal Facilities“, Symposium Verfahren, 17.–21. Juni 1996, Wien, S. 261-274.

²⁰⁷ IAEO 2005, S. 11-18.

²⁰⁸ Mary Finster und Kamboj Sunita, „International Low Level Waste Disposal Practices and Facilities—Fuel Cycle Research & Development“, Argonne National Laboratory, erstellt für das US-amerikanische Energieministerium (DOE), ANL-FCT-324, 7. Oktober 2011, <https://publications.anl.gov/anlpubs/2011/12/71232.pdf>, Stand 5. August 2011.

²⁰⁹ Ibidem, S. 60-66.

²¹⁰ Ulla Bergström, Karin Pers und Ylva Almén, „International perspective on repositories for low level waste“, SKB, Bericht R-11-16, Dezember 2011, S. 34-36, <http://www.skb.com/publication/2343713/R-11-16.pdf>, Stand 5. August 2019.

HLW-ENDLAGER

Die HLW-Endlager werden auf der Grundlage des Inventars an hochradioaktiven oder langlebigen, transuranischen Abfällen zugewiesen. In diesem Sinne gilt WIPP in New Mexico (USA) als ein HLW-Endlager. Dies ist das einzige Endlager dieser Art weltweit, das errichtet und bis heute betrieben wurde. Die US-amerikanische Regierung begann mit der Suche nach einem Standort in den frühen 1970er Jahren nach dem Fehlschlag des Lyons Projekts. Der ursprünglich ausgewählte Standort wurde aufgrund von unter Druck stehenden Gas- und Laugeneinschlüssen²¹¹ aufgegeben, aber das Endlager wurde an einem zweiten Standort in den 1990er Jahren gebaut und betrieben. Ursprünglich war ein reversibles Endlager geplant.²¹² Die Ausstellung der Betriebsgenehmigung erfolgte vorbehaltlich der Bedingung, dass der Müll prinzipiell über einen Zeitraum von mehreren Hundert Jahren rückholbar sein muss.²¹³ Allerdings wachsen nach der Explosion/dem Feuer am 14. Februar 2014 Zweifel daran, ob dies überhaupt möglich ist. Es ist extrem unwahrscheinlich, dass das breite Spektrum von gelagertem Atommüll mit nicht recyclebaren Abfallmischungen der verschiedensten Herkunft jemals zurückgeholt wird.²¹⁴ Nach einem Einlagerungsstopp von mehr als drei Jahren wurde WIPP im Frühjahr 2017 wieder in Betrieb genommen.

Die Auswahl eines Standorts für ein geeignetes Endlager für abgebrannte Brennelemente und anderen hochradioaktiven Müll bleibt eine Herausforderung für jedes Land. Bis jetzt – und mit der Ausnahme von WIPP – gibt es nirgendwo ein in Betrieb befindliches tiefengeologisches Endlager für hochradioaktiven Abfall. Alle Projekte für tiefengeologische Endlager für radioaktive Abfälle befinden sich weltweit höchstens in einem frühen Planungsstadium. Wie Table 5 zeigt, unterscheidet sich der Status dieser Länderprojekte erheblich. Bis jetzt haben drei Länder (Finnland, Schweden und Frankreich) den Standort in einem frühen Ausschlussverfahren festgelegt. Diese Ländergruppe befindet sich in einem so fortgeschrittenen Stadium, dass die Baugenehmigung für die HLW-Endlager bereits erteilt wurde oder innerhalb des nächsten Jahrzehnts erwartet wird; und in Finnland die Bauarbeiten sogar schon begonnen haben. Allerdings bleiben unbeantwortete Fragen in Bezug auf Korrosion der zu verwendenden Lagerbehälter aus Kupfer,²¹⁵ was das Verfahren in den nordischen Ländern verzögern könnte.²¹⁶ Auch in Frankreich sind die Fortschritte der Aufsichtsbehörden langsamer als ursprünglich geplant.

²¹¹ Carl J. Mora, „Sandia and the Waste Isolation Pilot Plant, 1974–1999“, Sandia National Laboratories, Albuquerque, SAND99-1482, 1999.

²¹² H.H. Irby und M. Segura, „Retrievability of waste at WIPP“, Westinghouse Advanced Energy Systems Division, Transactions of the American Nuclear Society, Vol 34, 1980.

²¹³ NEA, „Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel“, Schlussbericht des NEA R&R Projekt, NEA/RWM/R(2011)4, Dezember 2011; und US-Regierung, „40 CFR 194–Criteria for the certification and re-certification of the waste isolation pilot plant’s compliance with the 40 CFR Part 191 Disposal Regulations“, Bundesvorschriften, 2019.

²¹⁴ Marcos Buser, „Endlagerung radio- und chemisch-toxischer Abfälle im Tiefuntergrund–Wissenschaftlich-technische, planerisch-organisatorische und strukturelle Schwachstellen–eine Beurteilung vier ausgewählter Fallbeispiele“, 2016, Greenpeace Deutschland.

²¹⁵ Mikael Ottosson et al., „Copper in ultrapure water, a scientific issue under debate“, *Corrosion Science*, Vol. 122, 1. Juli 2017, S. 53–60; und Fraser King, „Critical review of the literature on the corrosion of copper by water“, Integrity Corrosion Consulting, SKB, Technischer Bericht TR-10-69, Dezember 2010, http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/093/42093282.pdf, Stand 6. August 2019.

²¹⁶ Johan Swahn, „Comments on the ongoing licensing review of the planned repository for used nuclear fuel in Forsmark“, MKG, Seminar Vortrag, 24. Mai 2019, Stockholm, http://mkg.se/uploads/Swahn_MKG_presentation_Stockholm_May_24_2019.pdf, Stand 6. August 2019.

Tabelle 5: Länderprogramme für tiefengeologische Endlager für hochradioaktiven Abfall – Stand August 2019

Land	Atommüll	Wirtsgestein	Status Standort-auswahl	Unterirdisches Forschungslabor	Baugenehmigung	Zeiträumen für Endlagerebene
BELGIEN	SNF, HLW, TRU	Ton, nicht konsolidiert	benannt	Hades		nicht geplant
CHINA	HLW, TRU	kristallin, Ton	fortlaufend?	Beishan		nicht geplant
DEUTSCHLAND	SNF, HLW, TRU	Salz, Ton, kristallin	2017-2031 (gesch.)	kein		2050 (gesch.)
FINNLAND	SNF	kristallin	benannt (1985-2000)	Onkalo RF	2018	2024 (gesch.)
FRANKREICH	HLW, TRU	Ton, konsolidiert	benannt	Bure, Tournemire	2020 (gesch.)	nicht geplant
GROß-BRITANNIEN	HLW, TRU	Nicht spezifiziert, unterschiedliche nationale Politik von GB	2008	kein		nicht geplant
JAPAN	HLW, TRU	Kristallin, Sedimente	2010-2030 (gesch.)	Honorobe Mizunami, sonstige		nicht geplant
KANADA	SNF, HLW, TRU	kristallin	verschoben*	Kein		nicht geplant
NIEDERLANDE	SNF, HLW	offen	verschoben	kein		Lagerung >100 Jahre
SCHWEDEN	SNF (HLW)	kristallin	benannt (1980er-2009)	Äspö	fortlaufend (eingelagert 2011)	nicht geplant
SCHWEIZ	SNF, HLW, TRU	Ton, konsolidiert	2008-2030 (gesch.)	Mont-Terri		2060 (gesch.)
SPANIEN	SNF, HLW	Salz, Ton, kristallin	verschoben	kein		nicht geplant
TSCHECHISCHE REPUBLIK	HLW	kristallin	1990-2015 (gesch.)	kein		2065 (gesch.)
UNGARN	SNF, TRU	Ton	1995-2030 (gesch.)	Pécs		nicht geplant
USA	TRU-Abfälle	Salz	appointed (1972-1988)	kein	repository in operation (1998/2000)	
	SNF, HLW	Tuff (sonstige)	verschoben	kein		nicht geplant

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Grundlage der offiziellen Länderberichte im Rahmen des Gemeinsamen Übereinkommens.

Anmerkungen: *auf freiwilliger Basis.
gesch. = geschätzt; HLW = hochaktive Abfälle;
SNF = abgebrannter Kernbrennstoff; TRU = transuranische Abfälle.

Eine zweite Gruppe von Ländern, wie die Schweiz²¹⁷ und Deutschland²¹⁸, hat aktuell Standortsuchverfahren angeschoben, von denen man erwartet, dass diese innerhalb des nächsten Jahrzehnts beendet sein werden. Die anderen Länder haben Programme auf einer unterschiedlichen Stufe. Die Verschwommenheit der Projekte ist sichtbar. Insbesondere kleine Länder haben Schwierigkeiten, mit solch einem Programm umzugehen. Status und Fortschritt in China sind schwer einzuschätzen.²¹⁹ Wenig ist

²¹⁷ Schweizer Bundesamt für Energie, „Sachplan geologische Tiefenlager (SGT)“, https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/storymaps/EA_SachplanGeologischeTiefenlager/?lang=de, Stand 6. August 2019.

²¹⁸ Julia Neles, „Standortsuche Atommüll-Endlager–Es gibt keine einfache Lösung, aber wir müssen sie finden!“, Öko-Institut e.V., Aktualisierte Auflage 2017, S. 13, https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/nukleartechnik-anlagensicherheit/Lehrerhandreichung.pdf, Stand 6. August 2019.

²¹⁹ Yue Shu, Zhi-ming Liu et al., „A Review of the Development of Nuclear Waste Treatment for China’s Nuclear Power Industry“, Suzhou Nuclear Power Research Institute, 2. Internationale Konferenz zu nachhaltiger Entwicklung (ICSD 2016), *Advances in Engineering Research*, Vol. 94, Atlantis Press.

über die Fortschritte des Programms in Russland bekannt, welches ein besonderes Endlagerkonzept in unterirdischen Endlagern in Kristallingesteinen in Sibirien mit spezifischen Abfallformen und Abfallverpackungen, die in Bohrlöchern mit einer Länge von 75 Metern endgelagert werden sollen, beinhaltet, wobei keine Absicht besteht, diese wieder zurückzuholen.²²⁰ Schließlich sollte erwähnt werden, dass die internationalen Programme, die wiederholt bis vor einem Jahrzehnt erörtert wurden (z.B. Pangea, Arius), offensichtlich als nicht durchführbar erachtet werden.²²¹ Es sollte außerdem beachtet werden, dass sich Russland bereits angeboten hat, hochradioaktiven Atommüll von Drittländern abzunehmen und akzeptiert hat, abgebrannte Brennelemente zurückzunehmen.²²²

Wie bereits erwähnt, schreitet die Projektplanung fort. Die Projekte zur Endlagerauslegung, die auf dem ursprünglichen schwedischen KBS-Projekt basieren, haben sich über die Jahre hinweg unterschiedlich entwickelt, wie das Beispiel der Entwicklung des belgischen Supercontainers zeigt.²²³ Ob solche Strategien letztendlich implementiert werden können, kann allerdings nur im Zusammenhang mit der industriellen Entwicklung und Reife bestimmt werden. Dasselbe gilt für den gesamten Komplex der Rückholbarkeit und der Rückholtechniken, der für hochradioaktiven Atommüll entwickelt und in industriellem Maßstab getestet werden muss. Die diesbezüglichen Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprogramme müssen entsprechend angepasst werden. Schließlich muss die zentrale Rolle von Prozessmanagement und -steuerung, wie Strukturen, Organisation und Aufsicht, an die Notwendigkeiten von weitsichtigen, transparenten Projekten angepasst und entwickelt werden.

ENDLAGERUNG IN TIEFEN BOHRLÖCHERN

Wie bereits erwähnt, wurden in den letzten zehn Jahren diverse neue Projekte in Bezug auf die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern diskutiert. Aber – wie in dem Fall des Bergwerkkonzepts – sind extensive in-situ Durchführbarkeitstests und Demonstrationsanlagen erforderlich, um das Konzept zu industrieller Reife zu bringen. Der Zeitrahmen wird sich wahrscheinlich im Bereich von Jahrzehnten bewegen.

Insgesamt gesehen ist das Management von LILW-Programmen in vielen Ländern, die Atomenergie nutzen, heutzutage eine Routineaufgabe, die unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wird. Allerdings müssen noch eine Reihe von grundsätzlichen Fragen angegangen und gelöst werden, wie z.B. bituminierter Abfall, organischer Abfall, Diversität von Medizin-, Industrie- und Forschungsabfällen und die damit verbundenen Behandlungs- und Lagerprobleme. Heutzutage existieren zwei grundsätzliche Konzepte für hochradioaktiven Abfall: tiefengeologische Endlagerung in einer Tiefe von 500 – 1000 Metern und das Konzept von tiefen Bohrlöchern. Diese müssen bei vielen essentiellen Fragen spezifiziert und deren Funktionalität in industriellem Maßstab unter kontrollierten Prozessbedingungen getestet werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Durchführbarkeitsbeweis mindestens mehrere Jahrzehnte dauern wird.

²²⁰ Nikolai P. Laverov et al., „The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste“, *Elements*, Vol 12(4), August 2016, S. 253-256; und NEA, „Radioactive Waste Management and Decommissioning in the Russian Federation“, National Bericht, Nuclear Energy Agency/OECD, 2014, https://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/Russian_Federation_report_web.pdf, Stand 6. August 2019.

²²¹ WISE, „Multinational approaches“, World Information Service on Energy, *Nuclear Monitor Issue*, 2. Mai 2012, <https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/746-747-748/multinational-approaches>, Stand 6. August 2019.

²²² *Encyclopedia*, „Russia Agrees to Take the World’s Nuclear Waste: But Where to Put it ?“, 2001, <https://www.encyclopedia.com/history/energy-government-and-defense-magazines/russia-agrees-take-worlds-nuclear-waste-where-put-it>, Stand 6. August 2019.

²²³ Séverine Levasseur, Maarten van Geet und Xavier Sillen, „The Belgian supercontainer concept“, ONDRAF/NIRAS, Belgische Bundesbehörde für radioaktive Abfälle und angereichertes spaltbares Material, Vortrag beim IGD-TP 8. Exchange Forum, 3.-4. Dezember 2018, <https://igdt.eu/wp-content/uploads/2018/12/2.T2.1155-Levasseur-ONDRAF-Supercontainer-IGDTP.pdf>, Stand 6. August 2019.

Letztendlich betrifft eine fundamentale Beobachtung die Verschiebung der Konzepte, insbesondere für hochradioaktiven Abfall, und zwar in Richtung einer weniger definitiven Grundlage auf der Basis der Prognosen von Sicherheitsfällen. Wie das Schweizer EKRA-Konzept vor 20 Jahren erkannt hat, entwickeln sich die heutigen Konzepte zunehmend in die Richtung von überwachten Programmen. Das organisatorische Setting solcher Prozesse und die Garantie für die Unabhängigkeit der überwachenden Institutionen sind von übergeordneter Bedeutung für die zukünftige Entwicklung dieser Programme.

5.4 INTERIM-STRATEGIEN: LAGERUNG

Über Jahrzehnte hinweg hat es massive Verzögerungen bei der konkreten Implementierung von Projekten für alle Atommüll-Entsorgungsprogramme weltweit gegeben. Dies bezieht sich insbesondere auf Programme für die Endlagerung von hochradioaktivem Atommüll, für welchen es bis jetzt noch kein einziges verfügbares tiefeingeologisches Endlager gibt.

ZWISCHENLAGERUNG

Mit Genehmigung durch die nationalen Aufsichtsbehörden haben die verantwortlichen nationalen Behörden für die Projektdurchführung kontinuierlich die Implementierungspläne in der Vergangenheit angepasst und dementsprechend zusätzliche Zwischenlagerkapazitäten aufgebaut. Heutzutage findet Zwischenlagerung entweder direkt in/an den Atomkraftwerken oder in speziellen zentralen Zwischenlagern statt, und zwar entweder in Lagerbecken (Nasslagerung) oder in Spezialbehältern (Trockenlagerung). Darüber hinaus müssen – wie im Falle von Fukushima – Abrissarbeiten und improvisierte Zwischenlagerungssysteme für Brennelemente sowie für kontaminiertes Wasser oder anderen Atommüll in Erwägung gezogen werden.²²⁴

Im Hinblick auf die historische Entwicklung und aufgrund von Sicherheits- und Sicherungsfragen hat es generell einen rapiden Anstieg bei den Bemühungen in Richtung Trockenlagerung gegeben.

NASSLAGERUNG

Abklingbecken für abgebrannte Brennelemente sind bei Atomkraftwerken üblich, um für eine Kühlung nach der Entnahme aus dem Reaktor zu sorgen. Es gibt eine Menge an Erfahrung in Bezug auf Nasslagerung. Eine Nasslagerung außerhalb des Reaktorstandorts wird bei den Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich, Großbritannien und Russland verwendet. Seit 1985 betreibt Schweden eine unterirdische zentrale Nasslagereinrichtung (CLAB). Die Anlage besteht aus einem oder mehreren Becken für die Unterwasserlagerung von abgebrannten Brennelementen in Lagerregalen. Die Flüssigkeit im Lagerbecken gewährleistet eine Wärmeableitung und eine Abschirmung. Die Unterkritikalität²²⁵ muss durch Abstände und/oder neutronenabsorbierende Materialien beibehalten werden. Darüber hinaus benötigen Nasslagereinrichtungen Systeme mit einer kontinuierlichen Stromversorgung für die Aufnahme, die Dekontaminierung, das Entladen, die Wartung und die Rezirkulationssysteme für die Wasserkühlung und -aufbereitung. Außerdem hat Nasslagerung eine Handhabung von radioaktiven Abfällen (aus der Wasseraufbereitung) zur Folge, und zwar in Bezug auf die Strahlungsüberwachung und die Überwachung der Wasserchemie, die Leckageüberwachung und andere Hilfssysteme.²²⁶

TROCKENLAGERUNG

Trockenlagersysteme können für eine einzige Funktion (wie z.B. Kammern oder Behälter) und für eine Doppelfunktion (Spezialbehälter für den Transport und die Lagerung) ausgelegt sein. Heutzutage werden viele unterschiedliche Behältertypen mit Doppelfunktion verwendet, wie z.B. CASTOR in Deutsch-

²²⁴ Akira Yamaguchi et al., „Risk assessment strategy for Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station“, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 49(2), March 2017, S. 442-449.

²²⁵ Unterkritikalität ist ein Status, bei dem die Kettenreaktion nicht mit technischen Mitteln in Gang gesetzt werden kann.

²²⁶ IAEA, „Survey of Wet and Dry Spent Fuel Storage“, IAEA-TECDOC-1100, Juli 1999.

land, TN 24 in Belgien und NAC-STC in den USA. Kammern sind modulare Gebäude aus armiertem Beton mit Lagerplätzen für abgebrannte Brennelemente.²²⁷ Für die Lagerung müssen abgebrannte Brennelemente aus einem Transportbehälter entnommen und in eine Metallröhre oder einen Metallzylinder eingesetzt werden, welcher später versiegelt wird. Andere Kammersysteme enthalten bereits versiegelte Behälter, einschließlich abgebrannter Brennelemente. Es sind für die Handhabung der Behälter und der Brennelemente Systeme erforderlich. Die aktive Ventilation erfordert darüber hinaus Komponenten und Systeme. Kammersysteme werden in Kanada (ANSTOR/MACSTOR), Ungarn (MVDS Anlagen in Paks), in Großbritannien (Wylfa-Anlage) und in den Niederlanden (HABOG) verwendet. Einige Trockenlager-einrichtungen haben Behälter mit einer Funktion oder Doppelfunktion, bei denen es sich generell um einfache und versiegelte Systeme handelt. Diese Behälter bestehen aus einem Metallkörper mit Körben oder aus einem Betonkörper mit einer Metallauskleidung oder einem inneren Behälter, welche dann mit verschweißten oder versiegelten Deckeln verschlossen werden. Diese Doppelfunktionsbehälter werden am Atomkraftwerk geladen und entladen. Transportbehälter können außerdem für den Transport zur Lagereinrichtung verwendet werden. Doppelfunktionsbehälter aus Metall werden in der Schweiz (ZWI-LAG)²²⁸ und in Deutschland (Gorleben, Ahaus und andere Standorte)²²⁹ verwendet, während Betonbehälter überwiegend in den USA benutzt werden.

Im Jahre 2010 haben Forscher der IAEO die Mengen an angefallenen abgebrannten Brennelementen auf weltweit 340.000 tHM geschätzt; nur sieben Jahre zuvor betrug dieser Wert 255.000 tHM. Allerdings belief sich die weltweite Lagerkapazität zu Beginn des Jahres 2002 nur auf ca. 243.000 tHM, „wobei die hauptsächliche Lagerkapazität in den Reaktorlagerbecken 163.000 tHM“²³⁰ betrug. Für das Jahr 2020 haben die Forscher die Menge auf ca. 445.000 tHM geschätzt. Der Anstieg bei den Mengen von abgebrannten Brennelementen führt zu einer permanenten Erweiterung der Zwischenlagerkapazitäten. Mit anderen Worten erhöht sich der Lagerbestand kontinuierlich, während die Zeitpläne zur Implementierung von Endlagern regelmäßig in die Zukunft verschoben werden.

Die historischen Entwicklungen in den USA stehen exemplarisch für die Probleme für die Zwischenlagerung von Atommüll überall auf der Welt. Die USA haben anfangs einen erhöhten Bedarf an Trockenlagerkapazitäten gesehen, um die Lücke zu schließen, bis das tiefengeologische Endlager Yucca Mountain betriebsbereit sein würde. Mit dem drohenden Scheitern des Endlagerprojekts aufgrund der Probleme bei der Beweisführung in Bezug auf die langfristige Sicherheit, haben sich die vorgesehenen Lagerzeiträume verlängert. Im Jahre 2010 hat die Aufsichtsbehörde ihre Politik weiterentwickelt, um zu gewährleisten, dass abgebrannte Brennelemente sicher für Zeiträume von bis zu 60 Jahren nach dem Ende des Betriebs eines Reaktors gelagert werden können. Da das Ziel eines Reaktorbetriebs mögliche Verlängerungen von bis zu 60 Jahren beinhaltet, wird sich der daraus ergebende Zwischenlagerungszeitraum auf 120 Jahre verlängern.²³¹ Allerdings sind die tatsächlichen zeitlichen Anforderungen nach dem Scheitern der einzigen Endlageroption vollkommen offen. Es gibt momentan weder eine Alternative noch Strategien zur Auffindung eines Standorts. Die Trump-Administration unterstützt eine Neuauf-

²²⁷ IAEO, „Storage of Spent Nuclear Fuel“, IAEA Safety Standards Series, Nr. SSG-15, 2012.

²²⁸ Zwiilag Website, „Casks for highly active waste and spent fuel elements“, o.D., <https://www.zwilag.ch/en/casks-for-highly-active-waste-and-spent-fuel-elements-content---1-1049.html>, Stand 2. August 2019.

²²⁹ Olaf Oldiges und Jean Michel Boniface, „TGC36 A Dual Purpose Cask for the Transport and Interim Storage of Compacted Waste (CSD-C) – 8349“, GNS Gesellschaft für Nuklear-Service und AREVA Group, Waste Management Conference 2008, 14.-18. Februar 2008, Phoenix, Arizona, <https://pdfs.semanticscholar.org/21f1/76354b78eb9a241eb16072e7652b565ddcb9.pdf>, Stand 2. August 2019.

²³⁰ K. Fukuda et al., „IAEA Overview of global spent fuel storage“, Department of Nuclear Energy, IAEO, 2003, IAEA-CN-102/60, S. 4-6, http://www.efn-uk.org/l-street/politics-lib/nuclear-reports/index_files/IAEASpentfuel.pdf, Stand 2. August 2019.

²³¹ Gemäß Gesetz 10 von 2014, „Continued Storage of Spent Nuclear Fuel“, 10 CFR Part 51, §51.23.

nahme des Genehmigungsverfahrens von Yucca Mountain trotz des anhaltend starken Widerstands vonseiten der Regierung des Bundesstaats Nevada.²³² In ihrem im Jahre 2012 veröffentlichten Bericht ist die American Blue Ribbon Commission zu der Nuklearen Zukunft der USA zu dem Schluss gekommen, dass sich die Programmverzögerungen „in Jahrzehnten“ messen lassen und viele Milliarden zusätzlicher Kosten verursachen werden.²³³

Diese Entwicklung betrifft alle Länder, die Atomenergie nutzen. In der Schweiz hat die Bundeskommission für Atomsicherheit ungefähr in demselben Zeitraum (2011) eine Zusammenstellung der Zeitentwicklungen der Schweizer Programme verlangt. Diese haben die Schlussfolgerungen in Bezug auf Verzögerungen von vielen Jahrzehnten bei dem Schweizer Programm bestätigt.²³⁴ Die Auswirkungen auf die Kostenentwicklung in der Schweiz liegen auch im zweistelligen Milliardenbereich.²³⁵ Heutzutage erwarten die meisten Länder Umsetzungszeiträume für deren Endlagerprogramme von mindestens vier bis sechs Jahrzehnten. In Finnland, Schweden und Frankreich geht man von kürzeren Umsetzungszeitplänen aus, weil die Standorte für die Endlagerungsprogramme bereits ausgewählt worden sind. Allerdings sind selbst in diesen Ländern weder die Zeitpläne noch die tatsächlichen Kosten in Stein gemeißelt. Aus diesen Gründen wird eine Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und hochradioaktivem Abfall für viele Jahrzehnte bis zu mehr als einhundert Jahre und noch länger fort-dauern.

LANGZEIT-ZWISCHENLAGERUNG

Dieser in allen Ländern verwendete Ansatz wird in dem weiteren Bau von Lagerkapazitäten für die Langzeit-Zwischenlagerung und deren Betrieb für einen sehr langen Zeitraum resultieren (von vielen Jahrzehnten bis zu 100 Jahren oder mehr). Diese Diskussion hat bereits in den 1980er und 1990er Jahren stattgefunden, vor allem in den USA im Zusammenhang mit der Negotiated Monitoring Retrievable Storage (NMRS) oder mit den Konzepten „Away From Reactor“ (AFR)²³⁶ und in Großbritannien mit einer Langzeitlagerung über Zeiträume von 100 bis 300 Jahren.²³⁷ Die Strategie von „Away-from-Reactor-Storage“ wurde auch wieder durch die Blue Ribbon Commission (2012) in den USA aufgebracht.²³⁸ Die Integrität und Rückholbarkeit von abgebrannten Brennelementen (und HLW) über solche Lagerzeiträume stellen aus diesem Grunde eine wachsende Herausforderung dar; dies gilt auch für die Aufgaben der Überwachung und Wartung. Das Ziel besteht darin, Optionen für weitere Management-Pfade für radioaktive Abfälle und deren Anforderungen, wie Transport, Konditionierung und Verpackung, offenzuhalten. Folglich besteht eine große Notwendigkeit für Forschung, z.B. in Bezug auf das langfristige Verhalten von Brennelementen, die Abbaumechanismen und andere Wissenslücken.

²³² World Nuclear News, „US budget request supports Yucca Mountain“, 12. März 2019, <http://world-nuclear-news.org/Articles/US-budget-request-supports-Yucca-Mountain>, Stand 29. Mai 2019.

²³³ Blue Ribbon Commission, „Report to the Secretary of Energy“, Januar 2012, S. 48, op.cit.

²³⁴ INA, „Erfahrungswerte bei der Planung und Umsetzung des Sachplans und des Realisierungsplans geologische Tiefenlager und Planungsgrundlagen für das weitere Vorgehen“, Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft, September 2011.

²³⁵ Marcos Buser, „Kosten nukleare Entsorgung Schweiz: eine erste Evaluation des Systems der Kostenberechnung“, Bericht für Greenpeace Schweiz, Januar 2016, https://storage.googleapis.com/planet4-switzerland-stateless/2019/06/91fcc6d7-sammelmappe2_buser.pdf, Stand 1. Juni 2020,

²³⁶ Kristin Shrader-Frechette, „Burying Uncertainty—Risk and the Case Against Geological Disposal of Nuclear Waste“, University of California Press, Dezember 1993, S. 218.

²³⁷ Nirex Ltd., „Literature Review of Approaches to Long-Term Storage of Radioactive Waste and Materials“, Nirex Bericht N/107, Juli 2004.

²³⁸ Blue Ribbon Commission, „Report to the Secretary of Energy“, Januar 2012, op. cit.

Die Integrität und Rückholbarkeit von abgebrannten Brennelementen und sonstigem hochradioaktivem Atommüll über lange Lagerzeiträume stellt eine wachsende Herausforderung dar; dies gilt auch für die Aufgaben der Überwachung und Wartung. Das Ziel besteht darin, Optionen für weitere Abfall-Management-Pfade und deren Anforderungen, wie Transport, Konditionierung und Verpackung, offenzuhalten.

Das Extended Storage Collaboration Program (ESCP) des internationalen Unterausschusses des Electric Power Research Institute (EPRI) identifiziert in einem Bericht technische Datenlücken für Trockenlagereinrichtungen, insbesondere in Bezug auf die Zersetzung der Auskleidung und der verschweißten Behälter.²³⁹ Der EPRI-Bericht zeigt auch, dass die Länder spezifische Probleme in Abhängigkeit von deren diesbezüglichen Trockenlagersystemen und in Bezug auf die Gesamtsituation haben. Weitere Themen in Bezug auf das langfristige Management von abgebrannten Brennelementen sind die Bereitstellung von Daten und Dokumentation, die Handhabung von beschädigten abgebrannten Brennelemente und der Einfluss von Abbrand und Brennstoffart (Uran oder MOX). Es werden dringend Lösungen für die folgenden Fragen benötigt: Welche Sicherheitsanforderungen sind für eine langfristige Lagerung erforderlich? Wie lange kann man hochradioaktiven Atommüll sicher handhaben? Welche Art von Infrastruktur (einschließlich von Heißen Zellen) ist langfristig erforderlich? Wie und wie lange kann oder sollte Expertise bewahrt werden?

WESENTLICHE HERAUSFORDERUNGEN BEI DER LANGZEIT-ZWISCHENLAGERUNG

Die anwachsenden Bestände und Risiken üben auf die Regierungen in den Ländern, die Atomenergie nutzen, Druck aus, um die Lücke zwischen Zwischenlagerung und der Realisierung von tiefeologischen Endlagern oder äquivalenten Lösungen besser zu handhaben.²⁴⁰ Eine Reihe von wesentlichen Fragen in Bezug auf das Lagerungsmanagement werden in Zukunft zur Diskussion stehen. Diese Fragen betreffen, zum Beispiel, eine generelle Sicherheitsanalyse der weltweit verfolgten Lagerungsstrategien in Bezug auf Nasslagerung in Lagerbecken und Trockenlagerung in Kammern oder anderen Anlagen sowie eine generelle Risikobewertung in Bezug auf die weltweiten Unterschiede bei den Zwischenlagereinrichtungen und in Bezug auf Lagerzeiträume, die 100 Jahre übersteigen. Bei der Nasslagerung muss man sich mit der Frage der Unterkritikalität über solche Lagerzeiträume sowie mit der Frage des gesamten Spektrums von Alterungs- und Zersetzungsmechanismen der gelagerten abgebrannten Brennelemente (auch in Trockenbehältern) auseinandersetzen. In Anbetracht der langen Lagerzeiträume muss den soziopolitischen und wirtschaftlichen Faktoren besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, die „das Risiko erhöhen, dass eine angemessene Wartung und Sicherheit bei den Lagereinrichtungen enden könnte, bevor der Abfall entfernt worden ist“.²⁴¹

²³⁹ EPRI, „International Perspectives on Technical Data Gaps Associated With Extended Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel“, Electric Power Research Institute, Bericht des Internationalen Unterausschusses, Kooperationsprogramm zu Langzeit-Zwischenlagerung, Technical Report 1026481, 2012.

²⁴⁰ Marcos Buser, 2019, „Wohin mit dem Atommüll?“, *Rotpunkt*, S. 204-206.

²⁴¹ Mark Holt, „Nuclear Waste Disposal: Alternatives to Yucca Mountain“, CRS, 6. Februar 2009, S. 23, op. cit.

Schließlich muss sich der Frage der langfristigen Lagerung von schwach- und mittelradioaktivem Abfall (LILW) zugewandt werden. Während sich weniger Sicherheitsprobleme während der Zwischenlagerung von LILW ergeben, stellen einzelne Atommüll-Kategorien auch hier besondere Herausforderungen, und zwar in Bezug auf die Handhabung und die hiermit verbundenen Risiken in geschlossenen Anlagen, dar. Die IAEO fordert, dass „die Verpackung unter den Bedingungen einer langfristigen Lagerung bis zur Endlagerung erfolgreich deren Eigenschaften unter zwei sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen beibehalten muss“; falls dies nicht garantiert werden kann, werden sich weitere Probleme ergeben, z.B. wenn sich der Betreiber des Endlagers weigert, den Atommüll anzunehmen, der nicht die Anforderungen der Annahmekriterien für radioaktive Abfälle (Waste Acceptance Criteria – WAC) erfüllt, „wie dies durch die Genehmigungsbedingungen des Betreibers vorgeschrieben ist.“²⁴² Deshalb haben Sicherheitsbehörden, wie die französische ASN, den Endlagerbetreiber kürzlich angewiesen, sich mit diesen Fragen auseinanderzusetzen und hierfür eine Lösung zur Verfügung zu stellen.²⁴³

5.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Management-Konzepte wurden langsam über die vergangenen Jahrzehnte hinweg entwickelt. Zuerst haben Regierungen die Strategie der Verdünnung und der Verklappung von radioaktiven Materialien in die Umgebung in den frühen Tagen der Atomenergie praktiziert. Dieser Vorgehensweise folgte schrittweise ein Überdenken in die Richtung eines Einschlusses der radioaktiven Abfälle und der Suche nach geeigneten oberirdischen Standorten oder Standorten in geologisch geeigneten Schichten der kontinentalen Kruste. Allerdings waren die nach den 1960er Jahren realisierten Projekte nur in der Lage, die hohen Sicherheitserwartungen in einem sehr beschränkten Ausmaß, falls überhaupt, zu erfüllen.

Mehr als 70 Jahre nach dem Beginn des Atomzeitalters befindet sich in keinem Land der Welt ein tiefengeologisches Endlager für abgebrannte Brennelemente in Betrieb. Finnland ist das einzige Land, das momentan ein tiefengeologisches Endlager für diese gefährlichste Art von Atommüll baut. Neben Finnland haben nur Schweden und Frankreich de facto den Standort für ein tiefengeologisches Endlager für hochradioaktiven Abfall in einem frühen Stadium eines Ausschlussverfahrens festgelegt. In den USA ist das Waste Isolation Pilot Project (WIPP) in Betrieb. Allerdings wird dieses Endlager nur für langlebigen, transuranischen Atommüll aus dem Atomwaffenprogramm verwendet, nicht jedoch für abgebrannte Brennelemente aus kommerziellen Reaktoren.

Trotz vielfacher Beispiele des Versagens von Auswahlverfahren und aufgegebenen Endlagern zeigt die heutige nationale und internationale Steuerung eine Präferenz für die tiefengeologische Endlagerung. Dies erfordert klare und ambitionierte Bedingungen für die Standortauswahl-, Exploration- und Genehmigungsverfahren. Trotzdem gibt es keine Garantie für die Durchführbarkeit der tiefengeologischen Endlagerung. Das ist der Grund weshalb das Verfahren zur Suche nach solchen Endlagern mit außerordentlicher Sorgfalt, auf der Grundlage industrieller Durchführbarkeit und Begleitung durch entsprechende Überwachung, durchgeführt werden muss. Einige Wissenschaftler sind der Meinung, dass eine überwachte, langfristige Lagerung in einer geschützten Umgebung verantwortlicher und sehr viel schneller erreichbar ist und deshalb realisiert werden sollte. Es gibt insgesamt einen ausgeprägten Konsens darüber, dass der momentane Forschungsstatus sowie die momentane wissenschaftliche Debatte und der Austausch mit Politikern und betroffenen Bürgern der Dimension der Herausforderung bei weitem nicht angemessen sind.

²⁴² IAEO, „Interim Storage of Radioactive Waste Packages“, *Technical Report Series* Nr. 390, 1998, S. 11-13, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS390_scr.pdf, Stand 24. August 2019.

²⁴³ ASN, „French National Plan for the Management of Radioactive Materials and Waste for 2016-2018“, Französische Atom-sicherheitsbehörde, 23. März 2017, <http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/Publications/Others-ASN-reports/French-National-Plan-for-the-Management-of-Radioactive-Materials-and-Waste-for-2016-2018>, Stand 2. August 2019.

Die Konditionierung, der Transport, die Lagerung und die Endlagerung von radioaktiven Abfällen stellen signifikante und wachsende Herausforderungen für alle Atomstaaten dar. Regierungen und Behörden stehen unter Druck, um das Management von Zwischenlagerungs- und Endlagerungsprogrammen zu verbessern. Für die Steuerung der Programme müssen Standards implementiert werden, einschließlich Planungsqualität und Sicherheit, Qualitätssicherung, Bürgerbeteiligung und Sicherheitskultur.

Die Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und hochradioaktivem Abfall wird für ein Jahrhundert oder länger andauern. In Anbetracht, dass tiefengeologische Endlager in den folgenden Jahrzehnten nicht zur Verfügung stehen werden, verschieben sich die Risiken zunehmend auf die Zwischenlagerung. Die momentanen Lagerpraktiken für abgebrannte Brennelemente und andere leicht dispergierbare Formen von mittel- und hochradioaktiven Abfällen waren nicht für lange Zeiträume geplant. Diese Praktiken stellen deshalb ein wachsendes und besonders hohes Risiko dar, insbesondere wenn andere Optionen (Verfestigung, Trockenlagerung) in verstärkten Anlagen zur Verfügung stehen. Die Langzeit-Zwischenlagerung von Atommüll erhöht die Risiken heute, kostet zusätzliche Milliarden und verschiebt diese Bürden auf nachfolgende Generationen.



6. KOSTEN UND FINANZIERUNG

Alle europäischen Staaten haben das Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle der IAEO unterzeichnet; dies war das erste Rechtsinstrument in Bezug auf die Frage der Sicherheit des Managements von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen weltweit.²⁴⁴ Hiermit sind diese Staaten dazu verpflichtet, angemessene Finanzmittel für das Management der Stilllegung bzw. des Rückbaus von Atomanlagen (Artikel 26) und für das Abfallmanagement von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen (Artikel 22) bereitzustellen und „zu vermeiden, dass zukünftigen Generationen unangemessene Belastungen aufgebürdet werden“ (Artikel 3). Allerdings haben diese Länder weder diese Aufgaben in Bezug auf deren Politik zum Abfallmanagement immer eindeutig getrennt, noch definieren sie genau, was Stilllegung beinhaltet. Es existieren ausgeprägte technologische und organisatorische Abhängigkeiten zwischen Stilllegung, Zwischenlagerung und Endlagerung.

Es ist schwierig, die Kosten für das Management von radioaktiven Abfällen zwischen den verschiedenen Ländern zu vergleichen. Zum Beispiel beziehen die USA das Management von schwachradioaktiven Abfällen als Teil der Stilllegung mit ein, das durch die Finanzmittel für die Stilllegung mitfinanziert werden soll.²⁴⁵ Im Gegensatz hierzu sind die Versorgungsunternehmen in Deutschland mit ihren Finanzmitteln zur Stilllegung nur haftbar bis zur Konditionierung der Abfälle, während die nachgelagerten Prozesse der Zwischen- und Endlagerung durch einen separaten öffentlichen Fonds bezahlt werden muss.

6.1 DIE ART DER FINANZIERUNGSSYSTEME FÜR STILLLEGUNG, ZWISCHENLAGERUNG UND ENDLAGERUNG

GRUNDSÄTZLICHE HAFTUNG FÜR STILLLEGUNG UND MANAGEMENT RADIOAKTIVER ABFÄLLE

Im Allgemeinen sind die Eigentümer oder Genehmigungsinhaber von Atomkraftwerken verantwortlich für die Wiederaufarbeitung, Konditionierung, Zwischenlagerung und letztendliche Endlagerung der Abfälle, die während des Betriebs und der Stilllegung eines Reaktors anfallen, und darüber hinaus für das langfristige Management von abgebrannten Brennelementen. Diese Verpflichtungen und Verantwortlichkeiten ergeben sich mit dem Betriebsbeginn. Um den Artikel 3 des Gemeinsamen Übereinkommens zu erfüllen, und zwar „um zu vermeiden, dass zukünftigen Generationen unangemessene Belastungen aufgebürdet werden“, wird in fast jedem Land ein einheitliches Konzept – das Verursacherprinzip – beobachtet, welches den Betreiber für die Kosten dieser Aktivitäten haftbar macht.

In einigen Ländern stehen einige zusätzliche Beihilfen oder Subventionen zur Verfügung, um die Haftung des Verursachers zu reduzieren, oder die Haftung wird von der öffentlichen Hand übernommen, und Steuergelder werden dazu verwendet, die Kosten zu tragen.²⁴⁶ Aufgrund der hohen Kapitalintensivität, der Langfristigkeit und der Gesundheits- und Sicherheitsrisiken ist das Management der Stilllegung und insbesondere der radioaktiven Abfälle stark reguliert. Die Aufsichtsbehörde ist in einigen Fällen eine zu diesem Zweck gegründete Institution und manchmal direkt eine staatliche Institution (wie z.B. ein Ministerium). Aber früher oder später werden die Staaten oftmals an irgendeinem Punkt direkt involviert, einschließlich der Finanzierung. Das letztgenannte Beispiel trifft insbesondere für das Management radioaktiver Abfälle zu; das Verursacherprinzip findet in den meisten Fällen nur in Bezug auf die Stilllegung und den Rückbau der Reaktoren Anwendung. Für die langfristige Lagerung von

²⁴⁴ IAEO, „Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“, 2001.

²⁴⁵ Kjersti Album, Tore Braend und Audun Randen Johnson, „How to Pay?—Financing decommissioning of nuclear power plants“, Naturvernforbundet/Friends of the Earth Norwegen, Mai 2017.

²⁴⁶ IAEO, „Policy and Strategies for Environmental Remediation“, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-3.1, 2015.

radioaktiven Abfällen hat sich eine Vielfalt von Organisationsmodellen entwickelt, bei denen die nationalen Behörden – nicht der Betreiber der Atomanlage – mehr oder weniger die technische und finanzielle Haftung für die sehr langfristigen Probleme des Managements radioaktiver Abfälle übernehmen (wie z.B. in den USA, in Deutschland und Frankreich).

Viele Länder betten das Verursacherprinzip in die nationale Gesetzgebung ein, aber wenden dies nicht strikt an. Die langfristigen Kosten und Risiken werden stattdessen sozialisiert und zukünftigen Generationen aufgebürdet; es wird von den Betreibern eventuell nur verlangt, zu der Finanzierung der langfristigen Kosten beizutragen.²⁴⁷ Selbst in den Ländern, in denen das Verursacherprinzip eine rechtliche Anforderung darstellt, wird ein Betreiber eines Atomkraftwerks finanziell nicht für alle Probleme haftbar gemacht, die sich während der langfristigen Lagerung des Atom Mülls ergeben. Außerdem können hohe Kosten auch nach dem Schließen der Entsorgungseinrichtung entstehen. Zum Beispiel muss der schwach- und mittelradioaktive Atom Müll an dem Standort Asse II in Deutschland aus einem aufgegebenem Salzbergwerk zurückgeholt werden, wobei die geschätzten Kosten in Höhe von € 4-6 Milliarden vom Steuerzahler zu zahlen sind; dagegen betragen die für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle während des Betriebs des Bergwerks erhobenen Gebühren nur ca. € 8,25 Millionen.²⁴⁸

ÜBERBLICK UND ART DER FINANZIERUNG

Das Management und die Kontrolle der Finanzmittel sind für jedes Finanzierungssystem von entscheidender Bedeutung; dies kann intern oder extern erfolgen. Die Finanzierung der Stilllegung und des Managements der radioaktiven Abfälle kann mit einem der nachstehenden Systeme erfolgen.²⁴⁹

- Extern getrennter Fonds: Die Betreiber übernehmen die finanziellen Verpflichtungen durch Zahlungen in einen externen Fonds. In diesem Fall übernehmen private oder staatliche unabhängige Institutionen das Management der Fonds. Ein Fonds kann die gesamte Industrie abdecken oder es kann einen einzelnen Fonds für jeden einzelnen Betreiber geben. Ein externer Fonds kann mit oder ohne die Übertragung der Haftungen und mit oder ohne eine Ausfallbürgschaft durch den Betreiber bestehen.
- Interner, nicht-abgegrenzter Fonds: Der Betreiber zahlt in einen selbstverwalteten Fonds ein und übernimmt das Management der Finanzmittel, die innerhalb der eigenen Vermögensgegenstände verbleiben.
- Interner getrennter Fonds: Der Betreiber ist dazu verpflichtet, einen Fonds autonom zu bilden und zu managen. Die Vermögenswerte müssen von den anderen Bereichen der Geschäftstätigkeit getrennt oder speziell für die Zwecke der Stilllegung und des Managements radioaktiver Abfälle zweckgebunden sein.
- Finanzierung aus öffentlichen Mitteln: Die staatlichen Behörden übernehmen die finanzielle Verantwortung, einschließlich der Kapitalbildung (z.B. über Steuern und Abgaben). Diese Option wird üblicherweise für Hinterlassenschaften von Atomkraftwerksflotten und aufgebene Standorte verwendet (Standorte für die der vorherige Betreiber in Konkurs gegangen ist oder einfach nicht mehr existiert, so wie das für die früheren ostdeutschen Reaktoren zutrifft).

²⁴⁷ Christian von Hirschhausen, „Nuclear Power in the Twenty-first Century – An Assessment (Part I)“, DIW Berlin, 2017.

²⁴⁸ Roland Kirbach, „Das Lügengrab“, *Die Zeit*, 10. September 2009, <http://www.zeit.de/2009/38/DOS-Asse/komplettansicht>, Stand 14. Juli 2019.

²⁴⁹ Ben Wealer, Christian von Hirschhausen und Jan Paul Seidel, „Decommissioning of Nuclear Power Plants and Storage of Nuclear Waste: Experiences from Germany, France, and the U.K.“, April 2019, in Reinhard Haas et al. „The Technological and Economic Future of Nuclear Power“, Springer VS, S. 261-286.

Die Trennung der Fonds gewährleistet allerdings nicht deren korrekte Verwendung. Die Fonds können beschränkt werden, sodass die haftende Organisation nicht uneingeschränkt über die angesammelten Geldmittel verfügen kann. Es können Rechtsvorschriften auf die Fonds, die über die Standard-Buchführungsprinzipien und über die allgemeine Steuergesetzgebung hinausgehen, auf die Fonds angewendet und entsprechende Beschränkungen in Bezug auf die Kapitalbildung, das Management und Investitionen auferlegt werden.²⁵⁰ Eine Beschränkung kann die Verwendung der Finanzmittel begrenzen, damit die zweckgebundenen Vermögenswerte nur für das Management der Stilllegung oder des Atommülls verwendet werden können. Eine externe Trennung der Fonds bedeutet nicht automatisch, dass die Fonds beschränkt und zweckgebunden sind. In Italien zum Beispiel zahlte der extern getrennte Fonds CCSE (La Cassa conguaglio per il settore elettrico)²⁵¹ alle Stilllegungskosten der öffentlichen Körperschaft Sogin, die für das Management der Stilllegung und des Atommülls verantwortlich ist. Aber die Fonds wurden teilweise für andere, im öffentlichen Interesse liegende Zwecke als die Stilllegung verwendet, weil es dem Staat freisteht, die Gelder für jedwede Zwecke zu verwenden.²⁵²

Es gibt vertretbare Vorteile für das externe Management der Fonds: ein höheres Maß an Transparenz, einen Schutz gegen eine Unterdeckung der finanziellen Ressourcen aufgrund des Konkurses der Betreiber und ein größeres Vertrauen der Öffentlichkeit. Abgesehen von den hohen Kosten für die Steuerzahler, können sich auch Probleme in Bezug auf die Wettbewerbspolitik der EU ergeben, weil eine finanzielle Unterstützung der Betreiber durch die entsprechende Regierung als staatliche Zuschüsse angesehen werden könnte.²⁵³

AKKUMULATION DER FINANZIELLEN MITTEL

Nachdem eine Kostenschätzung vorgenommen wurde (*siehe Abschnitt 6.2*), müssen die erforderlichen Mittel akkumuliert werden. Hierbei ist ein wesentlicher Faktor das Timing, weil die Geldmittel zur Verfügung stehen müssen, wenn diese benötigt werden. Das hauptsächliche Szenario besteht darin, einen Fonds über die gesamte erwartete Lebensdauer eines Atomkraftwerks aufzubauen. Allerdings sind auch kürzere Zeiträume vorstellbar (z.B. 25 Jahre in Deutschland). Immer häufiger werden Reaktoren abgeschaltet, bevor sie das Ende ihrer Betriebsgenehmigung erreichen; dies gilt zum Beispiel für die USA, wo viele Reaktoren aufgrund ungünstiger wirtschaftlicher Bedingungen bereits vom Netz genommen wurden oder vorzeitig vom Netz genommen werden. In einigen seltenen Fällen muss das Kapital in Fonds für die Stilllegung und Dekontamination eines Atomkraftwerks vor Beginn des Betriebs vollständig eingesammelt sein, so wie dies in Frankreich seit 2006 der Fall ist (also findet dieses Prinzip keine Anwendung auf die komplette Reaktorflotte, die in der Vergangenheit und momentan betrieben wird).²⁵⁴ Allerdings ist in Frankreich seit diesem Datum kein Reaktor in Betrieb gegangen.

²⁵⁰ Wolfgang Irrek et al., „Comparison among different decommissioning funds methodologies for nuclear installations : final report“, Wuppertal Institut, Schlussbericht im Namen der Generaldirektion der EU-Kommission für Energie und Transport, November 2011, <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/2609>, Stand 1. Juni 2020.

²⁵¹ In 2015, wurde CCSE umbenannt, und heißt heute „CSEA – Cassa per i servizi energetici e ambientali“.

²⁵² Wolfgang Irrek et al., „Vergleich der verschiedenen Methoden zur Finanzierung der Stilllegung nuklearer Anlagen – Schlussbericht (WP 1/ WP 3) Italien“, Wuppertal Institut im Auftrag der EU-Kommission, 2007.

²⁵³ Emilio Neri, Amanda French et al., „Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants“, Nuclear Energy Agency, OECD, NEA-7201, 2016.

²⁵⁴ Ibidem.

Die Kapitalbildung der Fonds kann entweder erreicht werden durch eine Gebühr, eine Abgabe auf den Stromverkauf, „intern“ durch die Betreiber, die die Mittel aus den Einkünften, die sie aus dem Stromverkauf erhalten haben, zurücklegen oder durch die Investitionen, die von den Fonds vorgenommen werden. Da die meisten Kosten erst in der Zukunft anfallen, besteht ein wesentlicher Aspekt darin, ob die Fonds oder zukünftigen Rückstellungen auf diskontierten oder nicht-diskontierten Kosten beruhen.²⁵⁵ Falls die Kosten nicht diskontiert werden, müssen die Betreiber den vollständigen Betrag der geschätzten Kosten zurücklegen. Nur wenige Atomfonds-Systeme verwenden nicht-diskontierte Kosten. Wenn die Kosten diskontiert sind, wird erwartet, dass die Finanzmittel über die Zeit hinweg anwachsen. In diesen Fällen werden die Rückstellungen unter Anwendung der Inflationsrate bis zum Datum der Fälligkeit festgelegt und anschließend mit einem Zinssatz diskontiert, der die erwartete Rendite darstellen soll. Die verwendeten Diskontierungsraten variieren stark (z.B. 5,5 Prozent in Deutschland gegenüber 1,5 Prozent in Spanien). Es wird nicht immer von einer Kostensteigerungsrate ausgegangen; in Frankreich wird erwartet, dass die Kosten für das Management der Stilllegung und der radioaktiven Abfälle mit der allgemeinen Inflationsrate wachsen, während in Deutschland eine „nuklearspezifische Inflationsrate“ in Höhe von 1,97 Prozent zusätzlich zu der Inflationsrate berechnet wird. Wenn man nur die allgemeine Inflationsrate anwenden würde, könnte dies zu einer Unterschätzung der Kosten und hierdurch des Fondsbetrags führen.

Abhängig von der Art des Fonds, sind eine wesentliche Quelle der Kapitalbildung die Investitionen der Gelder. Hier ergibt sich ein Interessenskonflikt zwischen dem Betreiber und der Aufsichtsbehörde bei der Wahl der Anlagestrategie. Der Betreiber wird typischerweise risikoreichere Anlagestrategien mit höheren Renditen vorziehen, während die Aufsichtsbehörde idealerweise eine sicherere Anlagestrategie vorziehen und niedrigere Renditen akzeptieren wird. In Schweden war zum Beispiel nach der Finanzkrise von 2008 die Rendite bei Anleihen mit langen Laufzeiten niedriger als erwartet, und die Bedenken einer Unterfinanzierung wuchsen, was zu einer Änderung der Anlagestrategie führte. Seit 2017 können die Fonds jetzt Mittel in weniger sichere Anlagen als staatliche Anleihen investieren. Geringe Änderungen bei der Annahme der Renditen haben Auswirkungen auf den gegenwärtigen Wert der Finanzmittel und dadurch auf den Betrag an Geldern, die zurückgelegt werden müssen; dies gilt im besonderen Maße, wenn die Rendite (Diskontsatz) einer Überschätzung unterliegt und die Rate der Kostenerhöhung unterschätzt wird.

Die Kapitalbildung ist außerdem abhängig von dem Umfang der Geldmittel. Eine Option ist die integrierte Abdeckung der Haftungen für das Management der Stilllegung und der Abfälle in nur in einem einzigen Fonds. In Schweden zahlen die Versorgungsunternehmen eine Gebühr auf den Strompreis, die in einen integrierten Fonds für das Management der Stilllegung und Abfälle fließt. In einigen Ländern werden unterschiedliche Kapitalbildungsmethoden gleichzeitig für beide Prozesse benutzt, z.B. in den USA, wo die Betreiber dazu verpflichtet sind, Gelder für die Stilllegung zurückzulegen, aber auch eine Gebühr auf den Stromverkauf für das Management von hochradioaktiven Abfällen zu zahlen (obwohl die Kapitalbildung momentan gestoppt ist). In Italien haben Betreiber in einen Fonds eingezahlt, aber die Kosten für das Management der Stilllegung und Abfälle werden durch eine allgemeine Abgabe auf den Stromverkauf abgedeckt, seit alle Atomkraftwerke nach einem Referendum stillgelegt wurden.

²⁵⁵ Eine Rückstellung ist ein Bilanzposten eines Betreibers, aber dieser stellt nur Passiva dar; das bedeutet nicht, dass diese Mittel zur Finanzierung der Stilllegung oder des Waste-Managements investiert werden.

6.2 KOSTENSCHÄTZUNGEN UND ERFAHRUNGEN

METHODIK DER KOSTENSCHÄTZUNG

Kosten müssen geschätzt werden, um Fonds zu bilden. Dies ist ein kritischer Aspekt der Finanzierung, insbesondere für unbekannte Projekte, wie ein tiefengeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle. Es sind unterschiedliche Methoden zur Kostenschätzung vorstellbar.²⁵⁶

- Die „Schätzung der Größenordnung“ ist eine grobe Berechnung ohne detaillierte technische Daten (z.B. indem man einige der Kostenangaben in der internationalen Literatur für gegeben ansieht und diese nur leicht an die Situation in dem Land anpasst, indem man Faktoren und ungefähre Verhältniszahlen herauf- oder herabsetzt).
- Die „Budgetschätzung“ basiert auf der Verwendung von Ablaufdiagrammen, Layouts und Einzelheiten der Anlage, wenn der Umfang definiert wurde, aber noch kein detailliertes Engineering durchgeführt worden ist (z.B. Modellierung auf der Grundlage von Referenzfällen oder differenziertes Modellieren für jede einzelne Anlage).
- Bei der „definitiven Schätzung“ wurden die Einzelheiten des Projekts erstellt, und deren Umfang und Tiefe sind gut definiert.

In der Realität sind die meisten Kostenschätzungen Budgetschätzungen, die auf Studien und Schätzungen aus den 1970er und 1980er Jahren basieren und die anschließend hochgerechnet wurden. In Frankreich, zum Beispiel, basierten die Schätzungen für die zukünftigen Stilllegungskosten bis 2013 auf einer Studie des Französischen Ministerium für Handel und Industrie von 1991, die die Annahmen bestätigten, die im Jahre 1979 durch die PEON-Kommission (commission pour la Production d'Électricité d'Origine Nucléaire) definiert wurden. EDF hat dann diese Schätzungen in einer repräsentativen Studie zur Stilllegung des Standorts Dampierre (vier 900 MW Blöcke) bestätigt. Zwischen 2014 und 2015 wurde eine Prüfung der geschätzten Stilllegungskosten für die Reaktorflotte von EDF auf Aufforderung des Französischen Ministeriums für Energie und Klima durchgeführt, welche im Anschluss an diese Prüfung eine Reihe von Empfehlungen an EDF richtete. Allerdings haben diese Empfehlungen nur zu begrenzten Änderungen bei der Kostenschätzung und den entsprechenden Rückstellungen geführt, obwohl die Schätzungen jetzt jährlich überprüft werden sollten.²⁵⁷ In einem kürzlichen Bericht über die technische und finanzielle Durchführbarkeit des Stilllegungsverfahrens hat die Französische Nationalversammlung Vorwürfe erhoben, dass EDF einen „ausgeprägten Optimismus“ an den Tag legen würde.²⁵⁸ Der Bericht kam zu dem Schluss, dass die vollständige Stilllegung länger dauern und dass der Rückbau des Atomkraftwerksparks insgesamt weitaus mehr kosten wird, als dies von EDF angenommen wird.

In den USA kam eine im Jahre 2016 durchgeführte Prüfung durch das US Office of the Inspector General (Bundesrechnungshof) zu dem Schluss, dass die Kostenschätzungen auf dem bestmöglichen Wissensstand aus Forschung und betrieblicher Erfahrung basieren sollten. Trotzdem basiert die Schätzung der Stilllegungskosten der Aufsichtsbehörde – Nuclear Regulatory Commission (NRC) – auf Studien, die zwischen 1978 und 1980 durchgeführten wurden. Die Prüfung empfahl, dass die Finanzierungsberech-

²⁵⁶ Irrek et al. 2007

²⁵⁷ EDF, „Consolidated Financial Statements at 31 December 2018“, Electricité de France, Februar 2019.

²⁵⁸ Commission du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, „Rapport d'Information déposé en application de l'article 145 du règlement par la mission d'Information relative à la faisabilité technique et financière du démantèlement des installations nucléaires de base – N° 4428“, Kommission der französischen Nationalversammlung für Nachhaltige Entwicklung und Regionalplanung, 1. Februar 2017.

nungsformel erneut bewertet werden muss, um festzulegen, ob eine standortspezifische Kostenschätzung effizienter sein würde. So hat während der Prüfung ein Betreiber angegeben, dass die Mindestformel der NRC die Stilllegungskosten auf US\$ 600 Millionen (€₂₀₁₆ 538,6 Millionen) schätzt, während eine Kostenschätzung der standortspezifischen Stilllegung durch den Betreiber zu einem Betrag von ca. US\$ 2,2 Milliarden (€₂₀₁₆ 2 Milliarden) führte.²⁵⁹

In Deutschland basieren die Kosten für die Stilllegung und das langfristige -Management der radioaktiven Abfälle auf Expertenmeinungen. Das private Unternehmen NIS (Siempelkamp) verwendet im Namen der Betreiber Kostenmodelle für beide Arten von Leichtwasserreaktoren, um die Stilllegungskosten durch Anpassung der Strategie und der infrage kommenden Reaktoren zu schätzen. Im Namen der Versorgungsunternehmen hat die private und in Besitz der Versorgungsunternehmen befindliche GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service) die Kosten für das Management radioaktiver Abfälle auf Zeitpläne und Kostenschätzungen gestützt, die durch das Deutsche Bundesamt für Strahlenschutz (BfS; jetzt Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung oder BASE) für die Entsorgungseinrichtungen geschätzt wurden. Die durch die privaten Unternehmen für die Versorgungsunternehmen erstellten Kostenschätzungen sind nicht öffentlich zugänglich.²⁶⁰

STILLEGUNGSKOSTEN

Bis heute sind nur wenige Reaktoren vollständig stillgelegt worden, während Hunderte von Atomreaktoren weltweit im Verlaufe der kommenden Jahrzehnte stillgelegt werden. Im Frühjahr 2018 befanden sich 154 Reaktoren in den verschiedenen Stadien der Stilllegung, während nur 19 Reaktoren (mit einer Leistung von nur ca. 6 GW) vollständig stillgelegt und somit rückgebaut waren (siehe Tabelle 1).²⁶¹ Dieses schlechte Ergebnis und ein Mangel an länderspezifischer Rückbauerfahrung führt außerdem zu einer allgemeinen Unterschätzung der Stilllegungskosten. Atomkraftwerke wurden nur mit der Aussicht auf deren Betrieb gebaut, und die meisten der Anlagen, die sich momentan in der Rückbauphase befinden oder in diese eintreten, wurden zu einem Zeitpunkt gebaut, zu dem die Vorstellung der Stilllegung nicht vollständig konzeptualisiert war. Als Ergebnis hieraus müssen die Länder einen Ansatz zum Rückbau verwenden, der geprägt ist durch die Versuchs-und-Irrtum-Methode.

Ein Mangel an länderspezifischer Rückbauerfahrung führt zu einer generellen Unterschätzung der Stilllegungskosten. Atomkraftwerke wurden nur mit der Aussicht auf deren Betrieb gebaut, und zwar zu einem Zeitpunkt, zu dem die Vorstellung der Stilllegung noch nicht vollständig konzeptualisiert war. Als Ergebnis hieraus müssen die Länder einen Ansatz zum Rückbau verwenden, der geprägt ist durch die Versuchs-und-Irrtum-Methode.

Um die unterschiedlichen Schätzungen zwischen den verschiedenen Ländern vergleichbar zu machen, hat die Nuclear Energy Agency (NEA) die Internationale Struktur für die Stilllegungskosten (International Structure for Decommissioning Costing, oder ISDC) entwickelt, die die Stilllegungskosten in elf

²⁵⁹ U.S. Office of the Inspector General, „Audit of NRC’s Decommissioning Funds Program“, Defense Nuclear Facilities Safety Board, U.S.NRC, OIG-16-A-16, 8. Juni 2016.

²⁶⁰ Wolfgang Irrek und Michael Vorfeld, „Liquidity and valuation of assets in unrestricted funds from provisions set up for nuclear decommissioning, dismantling and disposal“, Kurzstudie, im Auftrag der Parlamentarischen Gruppe Bündnis 90/Die Grünen im Deutschen Bundestag, 7 September 2015.

²⁶¹ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

unterschiedliche Kostenkategorien einklassifiziert. Allerdings verwenden die meisten Methodologien der Kostenschätzung diese Klassifizierung nicht. Die Kostenschätzungen für die Stilllegung sind außerdem sehr stark abhängig von der Reaktortechnologie und der Rückbaustrategie. Zum Beispiel wurden in den USA bei einigen Anlagen große Komponenten – wie z.B. Reaktordruckbehälter und Dampferzeuger – entfernt und in einem Stück entsorgt, eine Strategie, die die Kosten erheblich reduziert. Allerdings schreibt der Gesetzgeber in Deutschland vor, dass große Komponenten vor Ort demontiert werden müssen. Im Allgemeinen sind die Eigentümer oder Genehmigungsinhaber dafür verantwortlich, Kostenschätzungen für die Stilllegungen zu entwickeln, welche diese dann in bestimmten Zeitabständen bei der zuständigen Aufsichtsbehörde zur Prüfung oder Genehmigung einreichen müssen (z.B. alle drei Jahre in Finnland und alle fünf Jahre in der Schweiz).

Daten über die tatsächlichen Stilllegungskosten sind selten, wobei nur drei Länder Stilllegungsprojekte bis zum vollständigen Rückbau durchgeführt haben. In den USA, in denen die meisten Reaktoren vollständig rückgebaut worden sind (13 von 34 abgeschalteten Atomkraftwerken bis Mitte 2018), zeigen die Stilllegungskosten große Unterschiede, zwischen US\$ 280/kW bis US\$ 1.500/kW (ca. €₂₀₁₆ 247/kW bis €₂₀₁₆ 1.325/kW).²⁶² In Deutschland sind nur zwei kommerzielle Reaktoren komplett rückgebaut worden: Die Stilllegung von Gundremmingen-A wurde nach 23 Jahren Rückbauarbeiten fertiggestellt und die Kostenschätzung betrug ungefähr € 2,2 Milliarden im Jahre 2013 oder € 9.300/kW. In Würgassen betragen die Stilllegungskosten ungefähr € 1,1 Milliarden oder € 1.700/kW.²⁶³ Alle deutschen Rückbauprojekte haben Kostensteigerungen von bis zu 6 Prozent pro Jahr erfahren; dies war sehr viel höher als die allgemeine Inflationsrate und als die angenommene nuklearspezifische Inflationsrate. Trotz der Kostenerhöhungen basieren die geschätzten Kosten für zukünftige Stilllegungen (ohne Behälter, Transport etc.) von ungefähr € 19,7 Milliarden²⁶⁴ oder € 830/kW noch immer auf den vorstehend erwähnten und nicht öffentlich zugänglichen Kostenmodellen.

In der Tschechischen Republik liegen die Schätzungen für die Stilllegung der sechs VVER-Reaktoren zwischen US\$ 412 – 532/kW (€₂₀₁₉ 371 – 479/kW), oder bei ungefähr US\$ 1,8 Milliarden (€₂₀₁₉ 1,6 Milliarden). VVER-Reaktoren, bei denen es sich um eine Serie von Druckwasserreaktoren handelt, die ursprünglich in der Sowjetunion entwickelt wurde, sind bisher noch nirgendwo in der Welt rückgebaut worden. Das am weitesten fortgeschrittene Rückbauprojekt ist Greifswald in Deutschland, wo die letzte Kostenschätzung für die fünf Blöcke und die kleinere Anlage in Rheinsberg ungefähr € 6,5 Milliarden oder € 3.090/kW beträgt; dies ist ungefähr acht Mal so hoch pro installierte Leistung wie die Schätzung für denselben Reaktortyp in der Tschechischen Republik.

In Frankreich und in Großbritannien ist bis jetzt noch kein einziges Atomkraftwerk vollständig stillgelegt worden. Im Jahre 2018 hat EDF die Gesamtkosten der Stilllegung für deren gesamte Reaktorflotte auf ungefähr € 31,7 Milliarden geschätzt. Für die 58 in Betrieb befindlichen Reaktoren betrug die Zahl € 25 Milliarden oder ungefähr € 400/kW.²⁶⁵ Dies ist in Anbetracht internationaler Standards sehr niedrig angesetzt. Die kombinierten Kosten für die hinterlassene Reaktorflotte der ersten Generation, die aus sechs UNGG-Reaktoren, einem Druckwasserreaktor, einem gasgekühlten Schwerwasserreaktor (EL-4) und dem Schnellen Brüter Superphénix besteht, haben sich ständig erhöht und seit 2001 ver-

²⁶² Ibidem.

²⁶³ Ben Wealer et al., „Stand und Perspektiven des Rückbaus von Kernkraftwerken in Deutschland („Rückbau-Monitoring 2015“), DIW Berlin und TU Berlin, November 2015.

²⁶⁴ Warth & Klein Grant Thornton, „Gutachterliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich“, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 9. Oktober 2015.

²⁶⁵ EDF, „Consolidated Financial Statements at 31. December 2018“, Electricité de France, Februar 2019.

doppelt, als diese auf ungefähr € 3,3 Milliarden geschätzt wurden.²⁶⁶ Bei einer kürzlich durchgeführten Prüfung ist die Französische Nationalversammlung zu dem Schluss gekommen, dass sie nicht die übertrieben optimistische Ansicht von EDF in Bezug auf den Rückbauteilen kann und einen weitaus teureren und technologisch herausfordernden Prozess erwartet. In Großbritannien erwartet die Behörde für die Stilllegung von Atomanlagen Kosten alleine für die 26 vom Netz genommenen Magnox-Reaktoren von ungefähr £ 15,3 Milliarden oder £ 3.500/kW (€₂₀₁₅ 20,9 Milliarden oder €₂₀₁₅ 4.794/kW).²⁶⁷ Im Jahre 2018 hat EDF Energy die Kosten für die Stilllegung ihrer 14 GCR-Reaktoren und des einen Druckwasserreaktors auf ungefähr € 15,7 Milliarden oder auf ungefähr € 1.800/kW geschätzt; diese Schätzung ist sehr niedrig für GCR-Reaktoren, insbesondere, wenn man die technologischen Probleme in Betracht zieht, denen sich EDF in Frankreich mit ihren GCR-Reaktoren ausgesetzt sieht. Und wenn man in Betracht zieht, dass die Kosten ständig ansteigen und dass der Vorschlag vorliegt, den vollständigen Rückbau bis zu Beginn des 22. Jahrhunderts aufzuschieben.²⁶⁸ Die Europäische Kommission summiert die verschiedenen Schätzungen der Stilllegungskosten der Mitgliedsstaaten (ohne die Niederlande und Italien) auf ungefähr € 123 Milliarden.²⁶⁹

ENDLAGERUNGSKOSTEN

Für das Management radioaktiver Abfälle sind die Kosten stark abhängig von den Endlagerungstechnologien, den Freigabewerten der Abfälle, den Abfallmengen oder in einigen Fällen den Entschädigungsprogrammen für die örtlichen Gemeinden, die der Ansiedlung der Endlager zugestimmt haben. Selbstverständlich sind die Kosten für die Endlagerung von Atommüll abhängig von der Höhe der Radioaktivität (LILW oder HLW). Für die erstgenannte Kategorie existiert eine Vielfalt von Endlagerungsoptionen, die Einfluss haben auf die Endlagerungskosten. Zum Beispiel ist die Endlagerung von Abfällen in oberflächennahen Gräben, wie in Frankreich, billiger als die Endlagerung von allen Abfällen dieser Kategorien in tiefegeologischen Endlagern, wie dies in Deutschland praktiziert wird. Weitere wichtige Faktoren, die die Endlagerungskosten beeinflussen, sind die Art und der Umfang des Inventars, die Annahmen zu Konditionierung und Verpackung, die Auslegungskonzepte, die Standorteigenschaften und das Auswahlverfahren; das Genehmigungsverfahren kann außerdem einen enormen Einfluss auf die Kosten haben.

In den meisten Fällen ist die Organisation, die für das Management der radioaktiven Abfälle verantwortlich ist, auch für die Entwicklung der Kostenschätzungen für das langfristige Management von Atommüll verantwortlich.²⁷⁰ Diese Organisation kann entweder staatlich sein (wie in Deutschland, Spanien und Großbritannien) oder sie kann sich in einigen Fällen in Besitz der Versorgungsunternehmen befinden, wie dies in Schweden und in der Schweiz der Fall ist. In Frankreich hat die staatliche Organisation ANDRA die Kosten für die Endlagerung von 12.000 m³ HLW und 72.000 m³ von langlebigen, mittelradioaktiven Abfällen (ILW-LL) in CIGEO auf € 31 Milliarden geschätzt. In den USA liegt die Endlagerung von HLW im Verantwortungsbereich des Department of Energy (DOE). Im Jahre 2008 hat das DOE die Kosten für die Endlagereinrichtung für HLW in Yucca Mountain auf ungefähr US\$ 96 Milliarden (€₂₀₀₈ 61,5 Milliarden) geschätzt. In Deutschland werden die diskontierten Kosten für eine Endlagerung für die 27.000 m³ von überwiegend abgebrannten Kernbrennstoffen auf ungefähr € 8,3 Milliarden geschätzt; die nicht-diskontierten Kosten belaufen sich auf € 51 Milliarden.

²⁶⁶ Cour des Comptes, „Le coût de production de l'électricité nucléaire—Actualisation 2014“, Bericht des Rechnungshoff, Mitteilung an den Untersuchungsausschuss der Französischen Nationalversammlung, 27. Mai 2014.

²⁶⁷ NDA, „Annual Report and Accounts—Financial Year: April 2014 to March 2015“, 30. Juni 2015.

²⁶⁸ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

²⁶⁹ Europäische Kommission, „Hinweisendes Nuklearprogramm—Vorlage vorgelegt gemäß Artikel 40 des Euratom-Vertrags zur Stellungnahme des Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss“, 4. April 2016.

²⁷⁰ IAEA, „Cost Considerations and Financing Mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste“, IAEA-TECDOC-1552, Juni 2007.

Bei der Endlagerung von HLW ist es wichtig, im Gedächtnis zu behalten, dass es sich bei allen veröffentlichten Zahlenangaben um Schätzungen handelt, weil bis jetzt noch kein Land ein tiefengeologisches Endlager für HLW eröffnet oder noch nicht einmal den Bau einer solchen Anlage abgeschlossen hat. Darüber hinaus ist es unmöglich, die Kostenschätzungen zu vergleichen, weil sich die zugrundeliegenden Faktoren unterscheiden. Zum Beispiel lagert Frankreich hauptsächlich verglaste Abfälle aus der Wiederaufbereitung, während die Mengen an abgebrannten Brennelementen für die Endlagerung in den USA sehr viel höher sind als in Deutschland. Außerdem unterscheiden sich die Länder darin, welche Kosten unter Zwischenlagerung und welche unter Endlagerung aufgeführt werden. Wie im Falle der Kostenschätzungen für die Stilllegung basieren auch diese häufig auf veralteten Studien. Die deutsche Kostenschätzung für HLW zum Beispiel basiert noch immer teilweise auf einer extrem groben Schätzung aus dem Jahre 1997 durch die deutsche Aufsichtsbehörde, zu dem Zeitpunkt Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), für den früher in Betracht gezogenen Standort Gorleben.

6.3 FINANZIERUNGSSYSTEME

FINANZIERUNGSSYSTEME FÜR DIE STILLLEGUNG

Bei den meisten Atomstaaten findet das Verursacherprinzip Anwendung auf die Stilllegung. Allerdings gibt es einige Fälle, bei denen der Staat die Handlungsverantwortung für die Stilllegung übernimmt (z.B. für die früheren ostdeutschen Reaktoren). Die grundsätzlich verantwortliche Organisation ist allerdings nicht immer die Organisation, die die Stilllegung auch vollständig finanziert. Bulgarien, Litauen und die Slowakische Republik erhalten Unterstützung für die Stilllegung durch die EU, im Gegenzug dafür, dass sie ihre alten sowjetischen Atomkraftwerke abgeschaltet haben.²⁷¹ In Spanien wird die Verantwortung für die Stilllegung und die Anlage, nachdem der Betreiber die Kernbrennstoffe aus der Anlage entfernt und die betrieblichen Abfälle konditioniert hat, auf die staatlich kontrollierte Managementagentur für radioaktive Abfälle ENRESA (La Empresa Nacional de Residuos Radiactivos) übertragen.²⁷² Nach der Übertragung müssen die ehemaligen Betreiber nicht weiter zu dem Stilllegungsfonds beitragen, selbst wenn die Kosten die entsprechenden Rückstellungen übersteigen.

Nicht alle Atomstaaten verlangen, dass die Stilllegungsfonds extern und getrennt von dem Betreiber oder Genehmigungsinhaber gehandhabt werden. Die Stilllegung ist in einigen Fällen noch immer durch intern getrennte und abgegrenzte Fonds finanziert, wie dies in Frankreich und in der Tschechischen Republik der Fall ist. Interne, nicht-getrennte Fonds wurden in fast allen Ländern, mit Ausnahme von Deutschland (und Südkorea, obwohl sich hier der Betreiber mehrheitlich in öffentlichem Besitz befindet), aufgegeben. In Deutschland sind die Versorgungsunternehmen noch immer dafür verantwortlich, Rückstellungen für die Stilllegung in unbeschränkten, nicht-abgegrenzten internen Fonds zu bilden. Die Unternehmen haben die Rückstellungen in Übereinstimmung mit den internationalen Buchführungsstandards gebildet und können ohne Einschränkung wählen, wie diese Mittel investiert werden. Dieses Finanzierungssystem ist ein Einzelfall und wurde im Hinblick auf die schwierige finanzielle Situation der Versorgungsunternehmen harsch kritisiert; die Fonds würden im Falle eines Konkurses des Versorgungsunternehmens verloren sein.²⁷³ In immer mehr Ländern übernehmen externe Körperschaften die Fonds für die Stilllegung. In der Schweiz und in Schweden, zum Beispiel, werden die Stilllegungskosten durch externe, abgegrenzte Fonds bezahlt. Großbritannien hat außerdem den Nuclear Liabilities Fund

²⁷¹ Europäischer Rechnungshof, „Hilfsprogramme der EU für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Litauen, Bulgarien und der Slowakei: Seit 2011 wurden Fortschritte erzielt, doch stehen kritische Herausforderungen bevor“, Sonderbericht Nr 22, 2016.

²⁷² Spanische Regierung, „Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management—Sixth Spanish National Report“, Oktober 2017.

²⁷³ Christian von Hirschhausen und Felix Reitz, „Nuclear Power: Phase-Out Model Yet to Address Final Disposal Issue“, DIW, DIW Economic Bulletin 4(8), 2014, S. 27-35.

(Haftungsfonds für Atomrisiken) eingeführt, einen unabhängigen Trust, der sich in 2018 auf £ 9,26 Milliarden (€ 10,42018 Milliarden) belief²⁷⁴ und der für die Stilllegung (und das Waste-Management) der in Betrieb befindlichen Fortgeschrittenen Gasgekühlten Reaktoren (AGR) verwendet wird, die von EDF Energy betrieben werden.

Die Stilllegungsfonds können durch eine Abgabe oder Gebühr gespeist werden, beinhaltet in dem Strompreis oder in einer zwangsweise erhobenen staatlichen Abgabe. Einige Länder haben beide Mechanismen, z.B. für unterschiedliche Generationen von Atomkraftwerken. In Frankreich zahlt EDF Gelder in den Stilllegungsfonds mit einem Satz auf den Strompreis ein, aber das Unternehmen selbst setzt die Höhe des Satzes fest.²⁷⁵ In der Schweiz und in Schweden sind, auf der anderen Seite, detailliertere Kostenstudien die Grundlage für angemessene Rückstellungen in den Fonds. In anderen Ländern, wie z.B. Deutschland, in denen es zwei oder mehr Finanzierungssysteme gibt, unterscheidet das Finanzierungssystem für die Stilllegung zwischen ausschließlich öffentlichen Anlagen, Anlagen mit gemischten Eigentumsverhältnissen und Anlagen im privaten Eigentum. Die Kosten für die Stilllegung der früheren Atomanlagen der DDR werden aus dem öffentlichen Budget finanziert.

Zusätzlich zu einem Mangel an Vorbereitung und technischer Expertise kämpfen die Länder, die ihre Atomanlagen stilllegen mit potentiellen weiteren finanziellen Unterdeckungen bei der Finanzierung der Stilllegung und in Bezug auf die entsprechenden Voraussagen. Es ist unklar, ob genügend Finanzmittel bereitgestellt wurden, um den vollständigen Rückbau zu bezahlen oder ob die Steuerzahler dazu herangezogen werden. Frühere Abschaltungen, Unterdeckungen bei den Fonds und steigende Stilllegungskosten zwingen einige Anlagen dazu, die Stilllegung aufzuschieben, um zusätzliche Finanzmittel aufzubauen. Länder ziehen darüber hinaus Wege in Erwägung, um Anlagen in die Lage zu versetzen, ihre Kosten durch höhere Gebühren, subventionierte Preise und längere Betriebszeiten abzudecken, z.B. in den USA und Japan.²⁷⁶ In den meisten Ländern decken die bereits eingestellten Rückstellungen nicht die Kostenschätzungen.

In den meisten Ländern decken die bereits eingestellten Rückstellungen nicht die Kostenschätzungen. Das Risiko einer Unterfinanzierung scheint ein Problem zu sein, mit dem sich fast alle Länder in Bezug auf die Stilllegung auseinandersetzen müssen.

Das Risiko einer Unterfinanzierung scheint ein Problem zu sein, mit dem sich fast alle Länder in Bezug auf die Stilllegung auseinandersetzen müssen. EDF hat nur ungefähr € 18,5 Milliarden oder 58 Prozent der geschätzten Kosten für den Rückbau in Rückstellungen eingestellt. In der Tschechischen Republik wurden nur 15 Prozent der Finanzmittel für Temelin und 28 Prozent der Finanzmittel für Dukovany in Rückstellungen eingestellt. Im Jahre 2016 betrug das Guthaben in dem Nuclear Decommissioning Trust Fund (NDT) ungefähr US\$ 64 Milliarden (ca. €₂₀₁₆ 60,5 Milliarden) mit spezifischen Rückbaukosten pro Reaktor von ungefähr US\$ 700/kW (€₂₀₁₆ 662/kW) für öffentlich-rechtliche Atomkraftwerke und US\$ 850/kW (€₂₀₁₆ 803/kW) für Anlagen, die sich im Besitz von Investoren befinden.²⁷⁷ Ein kürzlich in den USA aufgetretener Fall beleuchtet die inhärenten Risiken der unzureichenden Finanzierung. Der Betreiber Exelon

²⁷⁴ Nuclear Liabilities Fund, „Annual report and accounts 2018“, 21. Dezember 2018, http://nlf.uk.net/media/1076/nlf_annual_report_2018.pdf, Stand 27. Juli 2020.

²⁷⁵ Emilio Neri et al., „Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants“, NEA/OECD, NEA-7201, 2016.

²⁷⁶ Kjersti Album et al., „How to Pay?—Financing decommissioning of nuclear power plants“, Naturvernforbundet, Mai 2017.

²⁷⁷ Julia A. Moriarty, „2017 Nuclear Decommissioning Funding Study“, Callan Institute, 2017.

hat von Unterdeckungen bei dem Stilllegungsfonds für drei Reaktoren zwischen US\$ 6 Millionen und US\$ 83 Millionen (€₂₀₁₉ 5,4 Millionen und €₂₀₁₉ 74,7 Millionen) berichtet, obwohl die NRC Exelon eine Genehmigungsverlängerung von 20 Jahren mit der Vorstellung gewährt hat, zusätzliche Zeit zu gestatten, um den Stilllegungsfonds zu erhöhen.²⁷⁸ In 2017 verfügen die deutschen Versorgungsunternehmen über Rückstellungen in Höhe von ungefähr € 24,2 Milliarden für den Abriss der 23 kommerziellen Reaktoren. Dieser Betrag übersteigt die Kostenschätzung von € 19,7 Milliarden. Allerdings unterscheiden sich die Rückstellungen und die Kostenschätzungen in ihrem Umfang. Die Rückstellungen sollen auch die Kosten für Behälter, Konditionierung der Betriebsabfälle und den Transport abdecken, welche von der Schätzung ausgenommen waren. Also bleibt offen, ob die Rückstellungen ausreichen, um die Kosten zu decken. Darüber hinaus werden die Finanzmittel eventuell aufgrund des Mangels an Transparenz des deutschen Finanzierungssystems nicht für die Stilllegung investiert und die Sachanlagen werden eventuell in den kommenden Jahren weiterhin im Wert abnehmen.²⁷⁹

Tabelle 6 vergleicht die Finanzierungssysteme für Stilllegung in der Tschechischen Republik, in Frankreich und Deutschland. Die Tabelle umfasst das Finanzierungssystem, die Methode der Kapitalbildung, eine Gesamtkostenschätzung für den Rückbau und den Wert der Rückstellungen.

Tabelle 6: Finanzierungssysteme für Stilllegung in Deutschland, Frankreich und der Tschechischen Republik – Stand Dezember 2018

	DEUTSCHLAND	FRANKREICH*	TSCHECHISCHE REPUBLIK
FINANZIERUNGSSYSTEM	Intern nicht getrennt und nicht zweckgebunden	Intern getrennter und zweckgebundener Fonds	Intern getrennter und zweckgebundener Fonds
KONTROLLIERT DURCH	Betreiber	Betreiber	Betreiber
KAPITALBILDUNG DURCH	Rückstellungen durch die Betreiber	Abgabe auf den Strompreis	Gebühr auf den Strompreis
SCHÄTZUNG DER GESAMTKOSTEN	€ ₂₀₁₈ 19,5 Milliarden Für 23 kommerzielle Reaktoren** € ₂₀₁₈ 825,5/kW	€ ₂₀₁₈ 31,4 Milliarden für die gesamte Flotte € ₂₀₁₈ 395/kW für Betrieb; € ₂₀₁₈ 1.185/kW für Hinterlassenschaft	Temelín: € ₂₀₁₈ 744 Millionen Dukovany: € ₂₀₁₈ 878 Millionen € ₂₀₁₈ 360/kW bis € 465/kW
RÜCKSTELLUNGEN (IN % DER KOSTENSCHÄTZUNG)	€ 22,6 Milliarden*** (n.z.)	€ ₂₀₁₈ 18,3 Milliarden (58 %)	Temelín: € ₂₀₁₈ 113,3 Millionen (15 %) Dukovany: € ₂₀₁₈ 242,4 Millionen (28 %)

Quelle: Eigene Darstellung (2019).

Anmerkungen: *bezieht sich nur auf EDF

**ohne Kosten für Behälter, Transport und Konditionierung

***einschließlich von Rückstellungen für Behälter, Transport und Konditionierung (auch von Betriebsabfällen); in 2017.

FINANZIERUNGSSYSTEME FÜR ZWISCHENLAGERUNG

Die Kosten und die Finanzierungssysteme für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen, sowohl aus dem Betrieb als auch aus der Stilllegung, sind stark abhängig von der zur Verfügung stehenden Infrastruktur des Waste-Managements und der Existenz eines Endlagerungspfades für die Abfälle. Da es momentan keine Endlagerungslösung für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente gibt,

²⁷⁸ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al. „World Nuclear Industry Status Report 2018“, 2018, op. cit.

²⁷⁹ Wolfgang Irrek und Michael Vorfeld, „Liquidity and valuation of assets in unrestricted funds from provisions set up for nuclear decommissioning, dismantling and disposal“, 7. September 2015.

sehen sich alle Atomstaaten mit technologischen, organisatorischen und finanziellen Fragen in Bezug auf die Zwischenlagerung konfrontiert. Länder ohne Endlagerungslösung für LILW sehen sich zunehmend Problemen bei der Finanzierung der Zwischenlagerung für LILW in Anbetracht einer steigenden Zahl von Reaktorabschaltungen ausgesetzt.

Die Kosten für die Zwischenlagerung der Abfälle können aus den Betriebseinnahmen bezahlt werden (dies ist der Fall bei ČEZ in der Tschechischen Republik). In der Schweiz muss der Betreiber direkt die Kosten für das Management des Atom Mülls bezahlen, die sich aus dem Betrieb eines Atomkraftwerks und während der Nachbetriebsphase ergeben. In Deutschland machen die Versorgungsunternehmen Rückstellungen für die Zwischenlagerung ihrer Abfälle; die geschätzten diskontierten Kosten betragen ungefähr € 5,8 Milliarden in 2014.²⁸⁰ Nach der Finanzierungsreform wurde dieser Betrag in einen externen getrennten Fonds übertragen, und alle Kosten für die Zwischenlagerung, einschließlich derer für abgebrannte Kernbrennstoffe, die sich aus dem fortlaufenden Betrieb ergeben, werden durch den Öffentlichen Fonds bezahlt. In Schweden werden die Kosten für das zentrale Zwischenlager CLAB durch den Nuclear Waste Fund getragen.

Die komplizierteste Finanzierungssituation für die Zwischenlagerung von hochradioaktiven Abfällen existiert in den USA. Entsprechend dem Nuclear Waste Policy Act sollte das Department of Energy (DOE) im Jahre 1998, den hochradioaktiven Abfall in Form von abgebrannten Brennelementen übernehmen. Das Fehlen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle zwingt örtliche Versorgungsunternehmen dazu, abgebrannte Brennelemente an ihren eigenen Standorten zu lagern, dies beinhaltet auch bereits rückgebaute Standorte. Für diese Zwischenlagerung verlangen die Versorgungsunternehmen substantielle Entschädigungen durch das DOE, welches bis jetzt mehr als US\$ 10 Milliarden (€₂₀₁₉ 9 Milliarden) an gesetzlichen Strafgebern zahlen musste. Das DOE schätzt, dass sich der Gesamtschaden auf US\$ 20,8 Milliarden (€₂₀₁₂ 16,1 Milliarden) belaufen könnte, wenn das Ministerium im Jahre 2020 damit beginnen würde, die Brennelemente anzunehmen. Bei weiteren Verzögerungen könnten sich die Haftungen um Hunderte Millionen von Dollar jährlich erhöhen.²⁸¹ Das US-amerikanische Justizministerium verwaltet einen „Judgment Fund“ mit Steuergeldern von ungefähr US\$ 2 Millionen (€₂₀₁₉ 1,8 Millionen) pro Tag in Bezug auf alle Atomkraftwerke – unabhängig davon, ob diese in Betrieb oder stillgelegt sind – die die Regierung auf Entschädigung verklagt haben.

In Frankreich schätzt EDF einen Betrag von zusätzlich € 18,7 Milliarden für das Management von abgebrannten Brennelementen (z.B. für Lagerung und Wiederaufarbeitung) und einen weiteren Betrag in Höhe von € 1,2 Milliarden für die Entfernung und Konditionierung von Abfällen.²⁸² Dies führt zu einem Betrag in Höhe von € 51 Milliarden nur für das Handling und die Lagerung der beim Betrieb anfallenden Abfälle.

FINANZIERUNGSSYSTEME FÜR ENDLAGERUNG

Die Verursacher haften nicht immer finanziell für die Endlagerung (und teilweise auch für das Waste-Management); in einigen Fällen wird die Haftung auf eine staatliche Organisation übertragen, die außerdem für radioaktive Abfälle verantwortlich ist.²⁸³ Die meisten Länder verlangen, dass die Fonds für das langfristige Management von radioaktiven Abfällen extern und getrennt durch den Betreiber oder Genehmigungsinhaber gehandhabt werden. In Frankreich müssen die Betreiber von Atomkraftwerken zum

²⁸⁰ Warth & Klein Grant Thornton, „Gutachterliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich“, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 9. Oktober 2015.

²⁸¹ US Department of Energy, „Blue Ribbon Commission on America’s nuclear future“, 2012.

²⁸² EDF, „Consolidated Financial Statements at 31 December 2018“, 2019.

²⁸³ Wolfgang Irrek et al., „Vergleich der verschiedenen Methoden zur Finanzierung der Stilllegung nuklearer Anlagen – Schlussbericht (WP 1/ WP 3) Italien“, Wuppertal Institut im Auftrag der EU-Kommission, 2007.

Beispiel alle Kosten in Bezug auf das Management der radioaktiven Abfälle tragen, aber es wurde ein externer Fonds für den Bau und Betrieb, den endgültigen Rückbau, die Wartung und die Überwachung der Zwischenlagerungseinrichtungen und der Lagereinrichtungen für hochradioaktive Abfälle eingerichtet. ANDRA, die staatliche Behörde für Waste-Management, hält und verwaltet den Fonds (Artikel 16 des Abfallgesetzes von 2006).²⁸⁴ Darüber hinaus existiert auch ein interner beschränkter ANDRA-Fonds für Forschungszwecke. Die beiden Fonds werden durch Zahlungen von den internen Fonds des Betreibers zu dem Zeitpunkt, wo diese erforderlich sind, gespeist. Allerdings ist der einzige mit Geldmitteln ausgestattete Fonds im Moment der Fonds für die Forschung, weil es bis jetzt noch keine Baugenehmigung gibt. Stattdessen leiten die Betreiber Zahlungen aus ihrem internen Fonds (für Waste-Management) an das allgemeine Budget der ANDRA zur Finanzierung von Aktivitäten in Bezug auf die Endlager für kurzlebige, mittelradioaktive Abfälle.²⁸⁵ Gemäß dem Abfallgesetz von 2006 muss über die Vermögenswerte in den Fonds von EDF und Areva separat berichtet werden, und der Marktwert muss mindestens so hoch liegen wie die Haftungsdeckungssumme. Falls EDF in Konkurs geht, kann der Staat das Verfügungsrecht über die Vermögenswerte beanspruchen. Eine Behörde überwacht die internen Fonds; diese kann Korrekturmaßnahmen auferlegen, einschließlich des Rechts, Zahlungen in das ANDRA-Budget zu verlangen.

In Deutschland haben Privatunternehmen in dem alten Finanzierungssystem die Finanzmittel verwaltet, um die Endlagerung durch einen internen, nicht-beschränkten Fonds ohne behördliche Kontrolle abzudecken. Ein Gesetz im Jahre 2016 hat zu einer fundamentalen Änderung bei dem deutschen Finanzierungssystem geführt, und zwar durch die Einrichtung eines externen, beschränkten Fonds, der alle Aspekte in Bezug auf Endlagerung finanzieren muss.²⁸⁶ Der Fonds wurde mit dem Betrag der vorherigen Rückstellungen für das Management radioaktiver Abfälle in Höhe von € 24,1 Milliarden gespeist, einschließlich eines Risikozuschlags. Der „Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung“ wurde Mitte 2017 errichtet, um sicherzustellen, dass das Geld „sicher und profitabel“ investiert wird. Trotzdem wird der Steuerzahler die Finanzierungsverantwortung und zukünftigen Risiken tragen müssen; dies ist ein Verstoß gegen das Verursacherprinzip.²⁸⁷ Während des ersten Geschäftsjahres hat der Fonds nur einen Teil der Vermögenswerte investiert; der größte Teil wird noch von der Deutschen Bundesbank mit einem Zinssatz von 0,4 Prozent verwaltet. Das Ergebnis betrug ungefähr € 39 Millionen an Zinsaufwendungen im Laufe der ersten sechs Monate des Bestehens des Fonds.²⁸⁸ In den USA wird die HLW-Endlagerung durch den Nuclear Waste Fund über die Einnahme einer Abgabe in Höhe von US\$ 0,001 pro kWh auf den Strompreis finanziert. Im Laufe der Zeit hat der Fonds Finanzmittel in Höhe von mehr als US\$ 34,3 Milliarden (€₂₀₁₈ 30,1 Milliarden) angesammelt. Aufgrund eines Rechtsverfahrens gegen das Energieministerium im Jahre 2013 werden nicht länger Gelder in den Fonds eingezahlt, weil es das DOE versäumt hat, abgebrannte Brennelemente für die Endlagerung anzunehmen (*siehe Kapitel 7.8*). Großbritannien verfolgt einen anderen Ansatz zur Finanzierung der Stilllegung. Der Staat ist über die Nuclear Decommissioning Authority (NDA) für das Management und die Finanzierung für die Hinterlassenschaften von Abfällen und für die Stilllegungskosten der ersten Generation von Atomreaktoren (meistens Magnox) verantwortlich. Für die späteren und neugebauten Reaktoren werden die Kosten für

²⁸⁴ Französische Regierung, „Loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs“, Gesetz 2006-739, 28. Juni 2006.

²⁸⁵ Ben Wealer, Christian von Hirschhausen und Jan Paul Seidel, „Decommissioning of Nuclear Power Plants and Storage of Nuclear Waste: Experiences from Germany, France, and the U.K.“, in Reinhard Haas et al. „The Technological and Economic Future of Nuclear Power“, Springer VS, April 2019.

²⁸⁶ Deutsche Bundesregierung, „Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung“ (BGBl., I, S. 1843 768/16), 2016.

²⁸⁷ Elisabeth Jänsch, Achim Brunnengräber et al., „Wer soll die Zeche zahlen? Diskussion alternativer Organisationsmodelle zur Finanzierung von Rückbau und Endlagerung“, GAIA – *Ecological Perspectives for Science and Society*, Vol. 26(2), 2017, S. 118-120.

²⁸⁸ Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung, „Geschäftsbericht zum 31.12.2017“, 2018.

die Stilllegung und das Management radioaktiver Abfälle durch ein Funded Decommissioning Programme (Finanziertes Stilllegungsprogramm) finanziert; dieses basiert auf einem festen Einheitspreis, der im Prinzip durch die Betreiber finanziert wird. Es ist beabsichtigt, eine tiefengeologische Endlagerung zu finanzieren, die durch den Staat entwickelt und gehandhabt wird.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Finanzierungssysteme, die Schätzung der Gesamtkosten und die Rückstellungsfonds in ausgewählten Ländern. Die Angaben zeigen, dass es die Länder versäumen, ausreichende Rückstellungen zu bilden, um die erwarteten Kosten für die Endlagerung zu decken. Zum Beispiel haben Frankreich und die USA Rückstellungen für die Endlagerung gebildet, die nur ungefähr ein Drittel der geschätzten Kosten abdecken würden.

Tabelle 7: Finanzierungssysteme für Endlagerung in Deutschland, Frankreich und in den USA – Stand Dezember 2018

	DEUTSCHLAND	FRANKREICH*	USA
FINANZIERUNGSSYSTEM	Externer abgegrenzter Fonds	Interner und abgegrenzter Fonds, danach bei Baubeginn übergegangen zu Waste-Management-Behörde (ANDRA)	Externer Fonds
KAPITALBILDUNG DURCH	Investition der Fonds	Abgabe auf den Strompreis	Früher Abgabe auf den Strompreis, aber jetzt nicht mehr erhoben
SCHÄTZUNG DER GESAMTKOSTEN	€ ₂₀₁₈ 17,4 Milliarden**	€ ₂₀₁₈ 30,6 Milliarden	€ ₂₀₀₈ 61,5 Milliarden
RÜCKSTELLUNGEN (IN % DER KOSTENSCHÄTZUNG)	€ ₂₀₁₈ 23,9 Milliarden (>100 %)**	€ ₂₀₁₈ 9,7 Milliarden (32 %)	€ ₂₀₁₈ 30,1 Milliarden (36 %)

Quelle: Eigene Darstellung (2019).

Anmerkungen: *bezieht sich nur auf EDF **einschließlich Zwischenlagerung, Endlagerung LILW und HLW.

INTEGRIERTE FINANZIERUNGSSYSTEME

Aufgrund der ausgeprägten Abhängigkeiten und Interdependenzen zwischen Stilllegung, Zwischenlagerung und Endlagerung scheint ein integrierter, externer, getrennter und beschränkter („zweckgebundener“) Fonds der bestmögliche Ansatz zur Finanzierung der zukünftigen Kosten für diese Prozesse zu sein.²⁸⁹ Integrierte Finanzierung bedeutet, dass der Umfang des Fonds Stilllegung und Management radioaktiver Abfälle abdeckt. Die Länder mit einem integrierten Finanzierungssystem umfassen Schweden, die Schweiz und Großbritannien (jedoch nur für die in Betrieb befindlichen Reaktoren von EDF Energy).

In Schweden basieren die Beiträge (aus einer Gebühr auf den Strompreis) an den Atommüll-Fonds auf Kostenschätzungen, die durch SKB, der im Besitz der Versorgungsunternehmen befindlichen Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, durchgeführt und durch SSM, die Schwedische Strahlenschutzbehörde, überprüft wurden. Die Kostenschätzungen basieren auf detaillierten Untersuchungen und Rückbauplänen in Verbindung mit der Eröffnung der Endlagereinrichtungen. Diese Untersuchungen umfassen auch die geplanten Stilllegungsaktivitäten, einschließlich des geplanten Zeitablaufs und der Reihenfolge der Aktivitäten und der diesbezüglichen detaillierten Kosten. Eine aus Mitgliedern der SKB, den Betreibern, und Experten der Anbieter der technologischen Systeme der Anlagen bestehende Arbeitsgruppe wird diese Untersuchungen durchführen. Diese öffentlich zugänglichen Stilllegungspläne erhöhen zusätzlich die Transparenz.

²⁸⁹ Ben Wealer, Christian von Hirschhausen und Jan Paul Seidel, „Decommissioning of Nuclear Power Plants and Storage of Nuclear Waste: Experiences from Germany, France, and the U.K.“, April 2019, op. cit.

Die britische Regierung hat für die in Betrieb befindlichen Reaktoren der EDF Energy den Nuclear Liabilities Fund (NLF) im Jahre 1996 mit der alleinigen Funktion eingeführt, die aus dem Management radioaktiver Abfälle und der Stilllegung resultierenden Kosten zu finanzieren. Der Fonds wird durch zwei Quellen gespeist: eine kleine vierteljährliche Zahlung durch EDF Energy und die Erträge aus den Investitionen des Fonds. Wenn EDF Energy Zahlungen aus dem Fonds zur Erfüllung der Verbindlichkeiten erhalten möchte, wird hierzu nur ein Antrag an die NDA benötigt, die als Vertreterin der Regierung agiert. Die NDA genehmigt als Verwalter der Vereinbarungen über Haftungs-Management die NLF-Zahlungen für Stilllegung und Waste-Management. Allerdings kann die britische Regierung entscheiden, die Verantwortlichkeit für den Rückbau zu irgendeinem Zeitpunkt nach Beendigung der Stromerzeugung durch die Atomkraftwerke auf die NDA zu übertragen.²⁹⁰

Das Finanzierungssystem der Schweiz ist vergleichbar mit dem Schwedens (z.B. bestimmen die Kostenschätzungen für spezifische Atomkraftwerke die Beiträge zu dem Fonds), aber die Schweiz hat zwei Fonds eingerichtet: einen zur Finanzierung der Stilllegung und einen zur Finanzierung der Endlagerung der radioaktiven Abfälle. Die Betreiber der Atomkraftwerke müssen Gebühren in beide Fonds einzahlen, die sich unter der Aufsicht des Schweizerischen Bundesrats befinden.²⁹¹ Aber die Kostenstudien sind, wie in den meisten Ländern, nicht öffentlich zugänglich und werden von einem Privatunternehmen durchgeführt; in diesem Fall dasselbe Unternehmen wie für die Schätzungen der deutschen Rückbaukosten (NIS Ingenieurgesellschaft GmbH).

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die integrierten Finanzierungssysteme für Rückbau und Waste-Management. Es werden Informationen gegeben im Hinblick darauf, wer die Fonds kontrolliert (d.h. extern, intern, getrennt) und über die Kostenschätzungen. Die Daten decken auf, dass es die Länder versäumen, ausreichende Finanzmittel für die zukünftigen geschätzten Kosten zurückzulegen. Schweden hat Rückstellungen für die Stilllegung und das Management radioaktiver Abfälle gebildet, die nur zwei Drittel der geschätzten Kosten ausmachen; in Großbritannien beträgt dieser Wert weniger als die Hälfte (für die in Betrieb befindlichen Reaktoren) und in der Schweiz noch nicht einmal ein Drittel.

Tabelle 8: Integrierte Finanzierungssysteme für Stilllegung und Management radioaktiver Abfälle in Großbritannien, Schweden und in der Schweiz – Stand Dezember 2018

	GROßBRITANNIEN*	SCHWEDEN	SCHWEIZ
FINANZIERUNGSSYSTEM	Ein externer und zweckgebundener Fonds	Ein externer und zweckgebundener Fonds	Zwei externe getrennte und zweckgebundene Fonds (für Stilllegung und für Waste-Management)
KAPITALBILDUNG DURCH	Zahlung durch Betreiber	Gebühr auf Strompreis (für jedes einzelne Kraftwerk separat festgelegt)	Zahlung durch Betreiber
SCHÄTZUNG DER GESAMTKOSTEN	€ ₂₀₁₈ 23,3 Milliarden	€ ₂₀₁₈ 9,4 – 10,4 Milliarden	€ ₂₀₁₉ 22,15 Milliarden**
RÜCKSTELLUNGEN (IN % DER KOSTENSCHÄTZUNG)	€ ₂₀₁₈ 10,6 Milliarden (46 %)	€ ₂₀₁₇ 6,1 Milliarden*** (61 – 67 %)	€ ₂₀₁₈ 6,5 Milliarden (30 %)

Quelle: Eigene Darstellung (2019).

Anmerkungen: *EDF Energy Atomreaktoren;

**Geschätzte Gesamtkosten für einen Betriebszeitraum von 50 Jahren per 2019;

***per 2017.

²⁹⁰ Emilio Neri et al., „Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants“, NEA/OECD, NEA-7201, 2016.

²⁹¹ Swissnuclear, „Kostenstudie 2011 (KS11)“, Oktober 2011.

6.4 ZUSAMMENFASSUNG

Fast jede Regierung behauptet, das Verursacherprinzip anzuwenden, welches die Betreiber für die Kosten für den Rückbau sowie für die, Zwischen- und Endlagerung von Atommüll haftbar macht. In der Realität allerdings versäumen es die Regierungen, das Verursacherprinzip konsistent anzuwenden. Die meisten Länder erzwingen dies nur in Bezug auf die Stilllegung, obwohl es einige Fälle gibt, bei denen die Regierung die Handlungsverantwortung für die Stilllegung übernimmt (z.B. für die Reaktoren in der früheren DDR). Bulgarien, Litauen und die Slowakei erhalten EU-Unterstützung für den Rückbau. Die meisten Länder setzen das Verursacherprinzip nicht für die Endlagerungskosten von Atommüll durch. Hierfür übernehmen letztendlich Nationale Behörden mehr oder weniger die Finanzierungs- sowie die Handlungsverantwortung für das langfristige Management und die Endlagerung der Abfälle. Der Betreiber ist allerdings dazu verpflichtet, zur Finanzierung der langfristigen Kosten beizutragen. Selbst in den Ländern, in denen das Verursacherprinzip gesetzlich vorgeschrieben ist, wird dies nur unvollständig angewandt. Zum Beispiel wird ein Betreiber eines Atomkraftwerks nicht in Bezug auf irgendwelche Probleme finanziell haftbar gemacht, die sich ergeben, sobald eine Endlagereinrichtung geschlossen ist; dies ist der Fall für das deutsche Endlager Asse II, wo die Rückholung großer Mengen Atommülls vom Steuerzahler bezahlt werden muss.

Regierungen versäumen es, die Kosten für Stilllegung, Zwischenlagerung und Endlagerung von Atommüll ordnungsgemäß zu schätzen. Alle Kostenschätzungen enthalten zugrundeliegende Unsicherheiten aufgrund von langen Zeiträumen, Kostensteigerungen und geschätzten Diskontierungsraten (Kapitalbildung der Finanzmittel). Ein wesentlicher Grund für die Unsicherheit ist der Mangel an Erfahrung bei Projekten von Stilllegungen von Atomkraftwerken und Endlagerung von Atommüll. Nur drei Länder, die USA, Deutschland und Japan, haben bisher Stilllegungsprojekte, einschließlich des vollständigen Rückbaus, durchgeführt und verfügen deshalb über entsprechende Daten. Bis Mitte 2019 wurden nur 19 Reaktoren von insgesamt 181 abgeschalteten Atomreaktoren auf der Welt vollständig stillgelegt; hiervon wurden nur 10 bis zur „grünen Wiese“ vollständig rückgebaut. Aber selbst diese begrenzten Erfahrungen zeigen ein breites Spektrum an Unsicherheit, und zwar bis zu einem Faktor 5. In den USA unterschieden sich die Stilllegungskosten zwischen den einzelnen Reaktoren von US\$ 280/kW bis zu US\$ 1.500/kW (ca. €₂₀₁₆ 247/kW bis €₂₀₁₆ 1.325/kW). In Deutschland wurde ein Reaktor mit € 1.700/kW, ein weiterer mit € 9.300/kW stillgelegt.

Viele Regierungen basieren ihre Kostenschätzungen auf überholten Daten. Viele der in diesem Bericht betrachteten Länder, wie Frankreich, Deutschland und die USA, basieren ihre Schätzungen auf Studien aus den 1970er und 1980er Jahren und nicht auf die wenigen Fälle mit tatsächlich existierenden realen Daten. Die Verwendung von überholten Daten, die in den meisten Fällen durch die Betreiber, die Industrie oder staatliche Behörden erhoben wurden, führt höchstwahrscheinlich zu Schätzungen mit zu niedrig angesetzten Kosten und zu optimistischen Schlussfolgerungen.

Viele Länder verwenden außerdem zu optimistische Diskontraten. Ein wesentlicher Faktor, der zu der Unterschätzung der Kosten für das Management radioaktiver Abfälle und die Stilllegung führt, ist die systematische Verwendung von zu optimistischen Diskontraten. Ein grundlegender Aspekt der Finanzierung des Waste-Managements und der Stilllegung ist die Erwartung, dass das Kapital über die Zeit hinweg wachsen wird. In Deutschland wird zum Beispiel erwartet, dass die Geldmittel in Höhe von € 24 Milliarden, die für alle Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Abfallmanagement zurückgestellt wurden, fast auf das Vierfache auf € 86 Milliarden bis zum Jahre 2099 anwachsen würden. Die verwendeten Diskontraten variieren beträchtlich, und nicht alle Länder kalkulieren Kostensteigerungen mit ein, obwohl es wahrscheinlich ist, dass sich die Kosten schneller erhöhen werden als die allgemeinen Inflationsraten.

Um die Verfügbarkeit von ausreichenden Mitteln für das Management von Stilllegung, Abfällen und Endlagerung zu garantieren, müssen die Finanzierungssysteme sichere Bedingungen für die Unterhaltung der Fonds gewährleisten („zweckgebunden“). Sie müssen darüber hinaus sicherstellen, dass die sich in Rückstellungen befindlichen Finanzmittel ausreichen, um die tatsächlichen Kosten abzudecken. Einige Länder erfüllen eine der Bedingungen, aber versäumen es, die anderen Bedingungen zu erfüllen.

Die Länder unterscheiden sich signifikant im Hinblick darauf, wie sie die Finanzierung des Waste-Managements, der Zwischenlagerung und der Endlagerung planen. Nicht alle Atomstaaten verlangen, dass die Stilllegungsfonds extern und getrennt durch den Betreiber oder Genehmigungsinhaber gehandhabt werden. Der Rückbau wird in einigen Fällen noch durch interne, getrennte und beschränkte Fonds finanziert, obwohl die Gelder für das langfristige Abfallmanagement in den meisten Ländern extern verwaltet werden. Die Finanzierung von Stilllegung und Lagerung ist komplex; in den meisten Fällen existieren multiple Finanzierungssysteme in einem einzigen Land.

Im Hinblick auf die unterschiedlichen nationalen Ansätze definieren die Regierungen nicht immer, was „Stilllegung“ beinhaltet. Abfallmanagement ist ein wichtiger Aspekt der Stilllegung; dies gilt auch für das Management von abgebrannten Brennelementen. Aber beides fällt nicht immer unter die Definition „Stilllegung“; dies macht es schwierig, die Kosten der verschiedenen Länder zu vergleichen. Die Prozesse der Stilllegung, Zwischen- und Endlagerung sind stark miteinander verknüpft. Das ist der Grund, warum ein integrierter, externer, getrennter und beschränkter Fonds zur Finanzierung der zukünftigen Kosten für diese Prozesse als der bestmögliche Ansatz scheint. Nur wenige Länder haben sich für diese Lösung entschieden, und zwar Schweden, Großbritannien und die Schweiz; obwohl die Schweiz über zwei Fonds verfügt, einer für die Stilllegung und einer für das Waste-Management. Kein Land hat die vollständige Finanzierung von Stilllegung der Kraftwerke oder die Zwischen- und Endlagerung seiner Atommülls radioaktiven Abfälle sichergestellt. Dies wird eine Herausforderung für alle Länder darstellen, die Atomkraft nutzen.

Bis zum heutigen Tage hat noch kein Land die Kosten präzise geschätzt und die Lücke zwischen abgesicherten Finanzmitteln und Kostenschätzungen geschlossen. In den meisten Fällen wurde nur ein Bruchteil der erforderlichen Mittel zurückgestellt. Schweden hat zum Beispiel bis jetzt Finanzmittel für die Stilllegung und das Abfallmanagement in Höhe von zwei Dritteln der geschätzten Kosten zurückgestellt, für Großbritannien sind dies weniger als die Hälfte für die in Betrieb befindlichen Reaktoren und für die Schweiz noch nicht einmal ein Drittel. Dasselbe lässt sich für die Finanzierung der Zwischenlagerung der Abfälle beobachten. Frankreich und die USA haben Finanzmittel für die Zwischenlagerung zurückgestellt, die nur ungefähr ein Drittel der geschätzten Kosten abdecken würden. Da eine steigende Anzahl von Reaktoren aufgrund von ungünstigen wirtschaftlichen Bedingungen vorzeitig vom Netz genommen wird, steigt das Risiko der unzureichenden Finanzierung. Diese frühzeitigen Abschaltungen, die Unterdeckungen bei den Finanzmitteln und die steigenden Kosten zwingen einige Betreiber von Atomkraftwerken dazu, weitere Abschaltungen und Stilllegungen aufzuschieben, um zusätzliche Finanzmittel zu bilden. Darüber hinaus erwägen Länder Wege, damit die Anlagen ihre Kosten über höhere Gebühren, subventionierte Preise und Verlängerungen der Lebensdauer abdecken, dies gilt zum Beispiel für die USA und Japan.



7. LÄNDERSTUDIEN

7.1 TSCHECHISCHE REPUBLIK

ÜBERBLICK

Die Geschichte des Atomsektors der Tschechischen Republik reicht bis in die 1940er Jahre zurück. Aufgrund ihrer Uranerzvorkommen war die Tschechoslowakei ein wichtiger Uranproduzent für den Ostblock zu Zeiten des Kommunismus. Zwischen 1946 und 2016, als das letzte Bergwerk geschlossen wurde, wurden mehr als 112.000 Tonnen gewonnen.²⁹² Es gibt noch mindestens 119.000 Tonnen von bekannten Uranressourcen in dem Land. Es existieren Pläne für einen erneuten Abbau von Uran, falls dies kosteneffektiv werden sollte.

In dieser Zeit hat die Tschechoslowakei Uran zu Yellow Cake verarbeitet; die weitere Verarbeitung wurde in der Sowjetunion durchgeführt. Die chemische Verarbeitungsanlage für Uranerz in Dolní Rožínka ist noch heute in Betrieb, obwohl sie nur das in Sanierungszonen enthaltene Resturan verarbeitet.

Das erste Atomkraftwerk, Dukovany, ging zwischen 1985 und 1987 in Betrieb. Es besteht aus vier sowjetischen Druckwasserreaktoren (PWR) des Typs VVER 440 mit einer Gesamtleistung von 2.040 Megawatt (MW). Das Atomkraftwerk soll bis 2035 – 2037 in Betrieb bleiben, aber es wird eine Verlängerung der Laufzeit in Betracht gezogen. Das Atomkraftwerk Temelín hat zwei VVER 1000 Reaktoren mit einer Gesamtleistung von 1.055 MW, die im Jahre 2000 – 2002 in Betrieb gegangen sind. Es existieren außerdem zwei Forschungsreaktoren, LVR-15 und LR-0, im Forschungszentrum Řež und ein Universitätsreaktor, VR-1, an der Tschechischen Technischen Universität von Prag.

Im Jahre 2018 haben die tschechischen Atomkraftwerke 28,2 TWh Strom erzeugt, das entsprach einem Drittel der gesamten Stromproduktion.²⁹³ Die Staatliche Energiepolitik der Tschechischen Republik hat sich zum Ziel gesetzt, mindestens zwei weitere Atomkraftwerke bis 2040 zu bauen.²⁹⁴

²⁹² NEA und IAEA, „Uranium 2018—Resources, Production and Demand“, NEA No 7413, 2018, <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>, Stand 29. Mai 2019.

²⁹³ ERÚ, „Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR—IV. čtvrtletí 2018“, Energetický regulační úřad, Abteilung Statistik und Qualitätsüberwachung, 2018, http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrtletni_zprava_2018_IV_Q.pdf/f47bc2a0-05e3-4402-a1db-5b6e2b0a44a4, Stand 29. Mai 2019.

²⁹⁴ Ministerstvo průmyslu a obchodu, „State Energy Policy of the Czech Republic“, Ministerium für Industrie und Handel der Tschechischen Republik, Dezember 2014, https://www.mpo.cz/assets/en/energy/state-energy-policy/2017/11/State-Energy-Policy-2015_EN.pdf, Stand 29. Mai 2019.

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Das tschechische Klassifizierungssystem für Abfälle entspricht den Vorschlägen der IAEO. Die neueste Rechtsprechung befasst sich mit der Kategorisierung der Abfälle nur in einer sehr allgemeinen Art und Weise.²⁹⁵ Feststoffabfälle werden auf der Grundlage dessen klassifiziert, wie diese entsorgt werden:²⁹⁶

- kurzlebige radioaktive Abfälle, deren Radioaktivität nach einer Lagerung von höchstens fünf Jahren niedriger ist als die Freigabewerte;
- sehr schwachradioaktive Abfälle (VLLW) mit einer Radioaktivität, die höher ist als die der kurzlebigen radioaktiven Abfälle, die jedoch nicht irgendwelche besonderen Maßnahmen während der Entsorgung erfordern;
- schwachradioaktive Abfälle (LLW) mit einer Radioaktivität, die höher ist als die der kurzlebigen radioaktiven Abfälle, die jedoch gleichzeitig eine begrenzte Menge an langlebigen Radionukliden enthalten;
- mittelradioaktive Abfälle (ILW), die eine signifikante Menge an langlebigen Radionukliden enthalten und aus diesem Grunde einen höheren Grad an Isolation von der Umgebung als schwachradioaktive Abfälle erfordern; und
- hochradioaktive Abfälle (HLW), deren Wärmeentwicklung durch den Zerfall der Radionuklide, die hierin enthalten sind, während der Zwischenlagerung und Endlagerung berücksichtigt werden muss; nachdem diese Abfälle verarbeitet und behandelt sind, müssen diese die Annahmekriterien erfüllen und in tiefengeologische Endlager, die sich mehrere Hundert Meter unter der Erdoberfläche befinden, gelagert werden.

ABFALLMENGEN

Die Tschechische Republik hat die größten Mengen an Atommüll von allen Staaten, die erst kürzlich EU-Mitglied geworden sind. Zu Zeiten des Kommunismus wurden abgebrannte Brennelemente an den Lieferanten, die Sowjetunion, zurückgegeben. Allerdings akzeptiert Russland seit den frühen 1990er Jahren nicht länger die Rückgabe von Atommüll. ČEZ, der Betreiber der tschechischen Atomkraftwerke, hat an den AKW-Standorten Zwischenlager für Trockenbehälter gebaut, um abgebrannte Brennelemente nach deren Entfernung aus dem Abklingbecken zu lagern. Es gibt zwei Trockenlager, ein Trockenlager in Dukovany und ein Trockenlager in Temelín, mit einer Gesamtkapazität für 3.310 Tonnen abgebrannter Brennelemente.

Die tschechische Regierung veröffentlicht regelmäßig ein Abfallinventar. Die nachstehenden Daten entstammen dem neuesten Inventar, welches die Abfallmengen und die Aktivität per 31. Dezember 2016 aufzeichnet.

²⁹⁵ State Office for Nuclear Safety, „Decree No. 377 of 7th November 2016 on the requirements for the safe management of radioactive waste and on the decommissioning of nuclear installations or category III or IV workplaces“, Regierung der Tschechischen Republik, November 2016, https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasaky/377_Radioactive_Waste.pdf, Stand 29. Mai 2019.

²⁹⁶ State Office for Nuclear Safety, „Implementing Decree No. 422 of 14th December 2016 on Radiation Protection and Security of a Radioactive Source“, Regierung der Tschechischen Republik, Dezember 2016, https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasaky/422_Radiation_safety_fin.pdf, Stand 29. Mai 2019.

TABELLE 9: Atommüll in der Tschechischen Republik – Stand 31. Dezember 2016

Abfallart	Art der Lagerung	Lagerstandort	Menge
SNF (HLW)	Zwischenlager (trocken)	Dukovany und Temelín	1.174 tHM
	Zwischenlager (nass)	Dukovany und Temelín	654 tHM
LILW FLÜSSIG	Reaktor-Lagerbecken	Dukovany und Temelín	1.439 m ³
LILW FEST	Reaktor-Zwischenlager	Dukovany und Temelín	351,3 t
	Oberflächennahes Endlager (endgelagert)	Dukovany	11.520 m ³
VLLW			n.a.

Quelle: Bericht der staatlichen tschechischen Behörde für Atomsicherheit/SÚJB an Euratom (2018).

Die durch die Atomkraftwerke und Forschungsreaktoren anfallenden schwach- und mittelradioaktiven Abfälle werden in erster Linie vor Ort behandelt; flüssige Abfälle werden entweder bituminiert oder polymerisiert, wohingegen Feststoffabfälle entweder verdichtet oder nach Verbrennung verdichtet und in 200 Liter-Behältern verpackt werden. Mittelradioaktive Abfälle, die für eine Endlagerung zum jetzigen Zeitpunkt ungeeignet sind, werden zwischengelagert und sollen in einem tiefeingeologischen Endlager gelagert werden.

Die Regierung schätzt, dass der 40-jährige Betrieb der Atomkraftwerke Dukovany und Temelín fast 3.500 Tonnen abgebrannte Brennelemente produzieren wird.²⁹⁷ Jedes zusätzliche Betriebsjahr würde weitere 35 Tonnen Abfälle aus Dukovany und 36 Tonnen aus Temelín produzieren. Wenn drei zusätzliche Reaktoren gebaut würden, müssten annähernd 10.000 Tonnen abgebrannte Brennelemente bis Mitte des 22. Jahrhunderts entsorgt werden. Zusätzlich zu den abgebrannten Brennelementen müsste dieses Endlager auch 4.200 Tonnen Abfälle aus der Stilllegung der Atomkraftwerke, 140 Tonnen Betriebsabfälle und 84 Tonnen sonstiger Abfälle fassen.

Das oberflächennahe Endlager in Dukovany ist in erster Linie ausgelegt für LLW und ILW aus dem Betrieb von Atomkraftwerken. Die Gesamtkapazität beträgt ungefähr 55.000 m³, und bis zum Ende des Jahres 2016 wurden hier ungefähr 11.500 m³ Abfälle gelagert.²⁹⁸

Die durch den Betrieb der beiden tschechischen Atomkraftwerke (während einer Laufzeit von 60 Jahren) angefallenen geschätzten Gesamtmengen an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen belaufen sich auf 18.300 m³. Weitere 10.800 m³ werden während des Stilllegungsprozesses der beiden Atomkraftwerke anfallen.

Zusätzlich zu den bei dem Betrieb der Atomkraftwerke anfallenden radioaktiven Abfällen befinden sich in der Tschechischen Republik außerdem erhebliche Mengen an Abfällen aus dem Uranabbau. Das staatliche Unternehmen DIAMO verwaltet 18 Tailings-Teiche, die mit radioaktiven Schlämmen gefüllt sind, die sich über ein Gebiet von fast 600 Hektar erstrecken und insgesamt 54 Millionen m³ enthalten. Das

²⁹⁷ Ministerstvo průmyslu a obchodu, „Konceptce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice“, Ministerium für Industrie und Handel, Beschluss Nr. 852/2017, 29. November 2017, <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategie-a-koncepcni-dokumenty/2017/12/Konceptce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR.pdf>, Stand 29. Mai 2019.

²⁹⁸ RAWRA Website, „About repositories“, Tschechische Behörde für die Endlagerung von Atommüll, o.D., <https://www.surao.cz/en/public/operational-repositories/about-repositories/>, Stand 29. Mai 2019.

Unternehmen ist außerdem verantwortlich für 371 Abfallhalden mit einer Gesamtmenge von 49 Millionen m³ Materialien, die Reste von Uranerz enthalten.²⁹⁹

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

Das Gesetz von 1997 über die Friedliche Nutzung von Atomenergie und Ionisierende Strahlung (auch als Atomgesetz bekannt) dient als Rechtsrahmen für das Management von radioaktiven Abfällen in der Tschechischen Republik. Es wurde die Endlagerbehörde für Radioaktive Abfälle (RAWRA) eingerichtet, eine Behörde, die dem Industrie- und Handelsministerium unterstellt ist. RAWRA ist verantwortlich für das Management von radioaktiven Abfällen, einschließlich der sicheren Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen.

Die Staatliche Atomsicherheitsbehörde SÚJB (Státní úřad pro jadernou bezpečnost) ist verantwortlich für die Aufsicht über die Sicherheit von Atomanlagen, einschließlich von Endlagern, wie dies in dem Atomgesetz von 2016 festgelegt ist.³⁰⁰ Dieses behält die wesentlichen Prinzipien des vorhergehenden Gesetzes bei, aber verlangt zusätzlich ein weiteres Gesetz zur Standortauswahl für ein tiefengeologisches Endlager. Ein solches Gesetz ist bis jetzt noch nicht erlassen.

Im Jahre 2002 hat die tschechische Regierung die politischen Richtlinien für das Management von abgebrannten Brennelementen und anderen radioaktiven Abfällen angenommen, obwohl es diesbezüglich Widerspruch vonseiten des Umweltministeriums auf der Grundlage einer Strategischen Umweltbewertung gegeben hat. Die Politik definiert die Grundlagen des Managements von radioaktiven Abfällen und legt Zeitrahmen fest. Die Regierung hat diese Politik im Jahre 2017 aktualisiert.³⁰¹ Die öffentliche Beteiligung war begrenzt.

Abgebrannte Brennelemente werden in Trockenbehältern an den Standorten der Atomkraftwerke unter der Verantwortlichkeit von ČEZ gelagert, dem Unternehmen, das die Abfälle produziert hat. Sobald diese als Abfälle deklariert worden sind, fallen sie unter die Aufsichtsbefugnisse der RAWRA. Die RAWRA betreibt die Endlager in Dukovany, Litoměřice und Jáchymov (die beiden letztgenannten für Abfälle, die nicht aus der Stromerzeugung stammen). Es existieren Pläne für ein zentrales unterirdisches Lager für abgebrannte Brennelemente am Standort Skalka, aber diese Pläne werden heutzutage als überholt angesehen. Es wird nicht erwartet, dass die abgebrannten Brennelemente wiederaufgearbeitet werden, und zwar aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen.

Im Jahre 2002 hat die RAWRA sechs Granitstandorte ausgewählt, die potentiell geeignet sind für tiefengeologische Endlager, wie dies durch eine geologische Untersuchung der tschechischen Regierung vorgeschlagen wurde. Die Anregung für dieses Projekt entstammt der schwedischen KBS-3-Technologie für die Endlagerung von abgebrannten Brennelementen in einer Tiefe von 500 Metern in eingekapselten Behältern, die in Bentonitton eingelagert sind. Die RAWRA hat praktisch die Bedenken der ausgewählten Gemeinden und deren Einwohnern ignoriert. Hierdurch sind fortlaufende Konflikte zwischen den örtlichen Gemeinden und den zentralen Behörden entstanden. Die Plattform gegen tiefengeologische Endlager, deren Mitglieder 32 Städte und Dörfer und 14 Verbände umfassen, setzt sich gegen die Pläne zur Wehr.³⁰²

²⁹⁹ DIAMO, „Souhrnná Informace—o výsledcích monitoringu a stavu složek životního prostředí 2017“, 20. April 2018, https://www.diamo.cz/storage/app/media/_ke-stazeni/zivotni-prostredi/1-souhrnna-informace-o-vysledcich-monitoringu-a-slozek-zivotniho-prostredi-diamo-s-p/souhrnna-informace-o-vysledcich-monitoringu-a-stavu-slozek-zivotniho-prostredi-diamo-s-p-za-rok-2017.pdf, Stand 18. Mai 2019.

³⁰⁰ Weitere Informationen über das Atomgesetz unter: <https://www.sujb.cz/en/legal-framework/nuclear-law/>.

³⁰¹ Regierung der Tschechischen Republik, „The Concept of Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Management of the Czech Republic“, verabschiedet durch den Regierungsbeschluss Nr. 852/2017, 29. November 2017.

³⁰² Liste der Mitglieder der Plattform gegen ein tiefengeologisches Endlager „Platformy proti hlubinnému úložišti“: <http://www.platformaprotiulozisti.cz/cs/clenove-platformy/>.

Folglich ist die geologische Planung über mehrere Jahre hinweg in Verzug. Es werden neue Standorte in Betracht gezogen, bei denen sich eventuell weniger Widerstand der Öffentlichkeit entwickeln würde, die allerdings eventuell schlechtere geologische Bedingungen aufweisen. Per 2019 zieht die RAWRA neun potentielle Standorte in Betracht.³⁰³

Die Eignung des ausgewählten Standorts muss bis 2025 bestätigt werden; dies scheint optimistisch zu sein. Im Jahre 2030 soll der Bau eines unterirdischen Labors beginnen und anschließend nach 2050 sollen die Arbeiten an dem Endlager anfangen. Das Ziel ist, das Endlager bis 2065 in Betrieb zu nehmen.

KOSTEN UND FINANZIERUNG

Das erste Atomgesetz hat die Einrichtung eines durch das Finanzministerium verwalteten staatlichen „Nuklearkontos“ festgelegt. Die darin enthaltenen Finanzmittel sind für das Management von radioaktiven Abfällen zweckgebunden; dies umfasst die Entwicklung, den Betrieb und die zukünftige Schließung eines tiefeingeologischen Endlagers. Die hauptsächliche Einnahmequelle sind Gebühren, die von den Verursachern der radioaktiven Abfälle bezahlt werden. Dies bedeutet, dass das Verursacherprinzip Anwendung findet. Im Jahre 2018 waren auf dem Konto CZK 26,9 Milliarden (€₂₀₁₈ 1 Milliarde).³⁰⁴ Das Gesetz setzt eine Gebühr in Höhe CZK 55 pro MWh (€₂₀₁₉ 2,16 pro MWh) Strom fest, der in einem Atomkraftwerk produziert wird und in Höhe von CZK 30 pro MWh (€₂₀₁₉ 1,18 pro MWh). Wärmeenergie, die durch einen Forschungsreaktor produziert wird. Andere Produzenten von radioaktiven Abfällen müssen eine einmalige Gebühr bezahlen, die die Kosten abdeckt.³⁰⁵

Die Tschechische Regierung hat die Kosten für die Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen auf CZK 4,57 Milliarden (€₂₀₁₉ 179 Millionen) und die Kosten für die Endlagerung von abgebrannten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen auf CZK 111,4 Milliarden (€₂₀₁₉ 4,4 Milliarden) geschätzt; die Endlagerung wird durch ČEZ als Betriebsaufwand bezahlt. Gemäß einer Analyse der tschechischen Technischen Universität werden diese Gebühren nicht ausreichen, um die tatsächlichen zukünftigen Kosten zu decken.³⁰⁶

Ein weiterer Finanzierungsmechanismus bezieht sich auf die zukünftige Stilllegung von Atomanlagen. Diejenigen, die die Genehmigung haben, Atomanlagen zu betreiben, müssen finanzielle Rückstellungen für die Stilllegung aufbauen und einen Zeitplan erstellen, wobei beides mindestens alle fünf Jahre durch die Staatliche Behörde für Atomsicherheit genehmigt werden muss. Die RAWRA muss bestätigen, dass die Betreiber über diese Rückstellungen auf einem speziellen getrennten Konto verfügen.

Jedes Jahr stellt ČEZ einen Betrag von CZK 209 Millionen (€₂₀₁₆ 7,7 Millionen) für die Stilllegung der Anlage in Dukovany zurück. Per 31. Dezember 2016 betragen die Rückstellungen CZK 6 Milliarden (€₂₀₁₆ 222 Millionen); zu dem Zeitpunkt, zu dem die Anlage in Dukovany geschlossen wird, sollte hier ein Betrag von CZK 22,4 Milliarden (€₂₀₁₆ 828,2 Millionen) vorhanden sein. Der Gesamtbetrag der Rückstellungen für die Stilllegung von Temelín sollte sich auf CZK 18,4 Milliarden (€ 681,6 Millionen) belaufen. Per 31. Dezember 2016 verfügte ČEZ über Rückstellung [für Temelín] in Höhe von CZK 2,8 Milliarden (€₂₀₁₆ 103,5 Millionen) und stellt jährlich CZK 198,5 Millionen (€₂₀₁₉ 7,8 Millionen) in die Rückstellungen ein.³⁰⁷

³⁰³ RAWRA Website, „DGR in the Czech Republic“, Tschechische Behörde für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen, o.D., <https://www.surao.cz/en/public/deep-geological-repository/dgr-in-czech-republic/>, Stand 29. Mai 2019.

³⁰⁴ RAWRA, „Annual Report 2017“, 2018.

³⁰⁵ Regierung der Tschechischen Republik, „Verordnung Nr. 35/2017 Coll.“, 2017.

³⁰⁶ Jaroslav Knápek et al., „Updated Economic Model and Fee Calculation for the Nuclear Account for LLW/ILW and HLW/SNF“, 2017, Studie der Czech Technical University in Prague.

³⁰⁷ SÚJB, „The Czech Republic National Report under the Article 14.1 of Council Directive 2011/70/EURATOM of 19 July 2011 establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste“, 2018, SÚJB/ONRV/12439/2018, https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/EuroNZ_VP_RAO_2_1A.pdf, Stand 29. Mai 2019.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Management radioaktiver Abfälle in der Tschechischen Republik muss noch diverse Probleme lösen. Die Regierung hat die Verantwortung für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle übernommen; die Produzenten dieser Abfälle haften für die Endlagerungskosten und zahlen deshalb auf ein staatliches Nuklearkonto ein; das Ziel besteht darin, die vollständige Finanzierung in Zukunft sicherzustellen. Die durch die Abfallproduzenten gezahlten Gebühren reichen allerdings nicht aus, um alle nach der Stilllegung erwarteten Kosten abzudecken.

Entsprechend den Plänen der Regierung soll ein tiefengeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle bis 2065 in Betrieb sein. Das Standortauswahlverfahren hinkt allerdings hinter dem Zeitplan her, und der Widerstand der potentiell betroffenen Gemeinden ist gewachsen. Ein seit langem versprochenes Gesetz zu Endlagerung, welches das Standortauswahlverfahren besser definieren würde, ist noch nicht verfügbar. Die Kriterien für die Standortauswahl sind vage, und deshalb besteht die tatsächliche Gefahr darin, dass ein Standort ausgewählt wird, der nicht auf einer Langzeitsicherheit, sondern auf der Bereitschaft einer Gemeinde basiert, dies zu tolerieren. Eine langfristige Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen ist eine Möglichkeit, die noch nicht erörtert worden ist.

Im Gegensatz hierzu funktioniert das Management von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen vergleichsweise gut. Ein kleineres Endlager, welches praktisch voll ist, wird bald geschlossen. RAWRA wird zwei Endlager betreiben, ein Endlager für institutionellen radioaktiven Abfall, das Richard Endlager, in der Nähe von Litoměřice und – viel wichtiger – das Endlager Dukovany für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus den Atomkraftwerken.

7.2 FRANKREICH

ÜBERBLICK

Die Geschichte der Atomenergie Frankreichs begann mit der Entwicklung von Atomwaffen nach dem Zweiten Weltkrieg. Nach wenigen kleinen Reaktoren, die der Produktion von militärischen Atommaterialien dienten, baute Frankreich in den 1960er und frühen 1970er Jahren sechs Gasgekühlte Reaktoren (GCR), die zur Produktion von Plutonium und von Atomenergie ausgelegt waren. Danach baute Frankreich drei weitere Reaktortypen. Alle diese frühen Reaktoren sind abgeschaltet worden und befinden sich momentan in verschiedenen Stadien der Stilllegung.

Danach entwickelte Frankreich eine Flotte von 58 Druckwasserreaktoren (PWR) an 19 Standorten mit einer Leistung von 900 bis 1.450 MW; alle wurden durch Électricité de France (EDF) betrieben. Diese Reaktoren wurden zwischen 1977 und 1999 in Betrieb genommen, befinden sich immer noch in Betrieb und liefern ungefähr 72 Prozent des Stroms des Landes.³⁰⁸

Im Jahre 2007 begann EDF mit dem Bau des Europäischen Druckreaktors (EPR) in Flamanville. Die ursprünglich geplanten Kosten beliefen sich auf € 3,3 Milliarden und der Beginn des Betriebs war für 2012 geplant. Es wird jetzt erwartet, dass der Reaktor mindestens € 10,9 Milliarden kosten und dass der Betriebsbeginn frühestens Ende 2022 stattfinden wird.³⁰⁹

Bis zum Jahre 2001 wurde in Frankreich Uran abgebaut, obwohl Frankreich selbst vorher mehr Uran importiert hat, als es produzierte. Frankreich hat große Betriebskapazitäten an allen Schritten der nuklearen Brennstoffkette entwickelt. Frankreich betreibt außerdem Atomanlagen für militärische Zwecke. Die Hauptproduzenten von radioaktiven Abfällen sind EDF, Orano, der Betreiber von Anlagen der nuklearen Brennstoffkette, und die Kommission für Alternative Energien und Atomenergie (CEA). Diese bleiben jeweils verantwortlich, bis die Abfälle an die ANDRA übergeben und durch die ANDRA (die Nationale Agentur für das Management von radioaktiven Abfällen) gemanagt und/oder endgelagert werden. ANDRA ist eine öffentliche Agentur, die 1979 als eine Abteilung der CEA eingerichtet und 1991 in eine unabhängige Körperschaft umgewandelt wurde.

Die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen ist nationale Politik Frankreichs. Die meisten Uranoxid-Brennelemente (UOX) werden in La Hague wiederaufgearbeitet. Während heutzutage praktisch alle Kernbrennstoffe aus Frankreich stammen, wurden signifikante Mengen an ausländischem Kernbrennstoff in La Hague wiederaufgearbeitet. Der Großteil des abgetrennten Plutoniums wird zusammen mit abgereichertem Uran in MOX-Brennelementen in 22 Reaktoren wiederverwendet; unter diesen befinden sich die ältesten Reaktoren der Flotte (die Regierung hat Pläne bekanntgegeben, MOX in den jüngeren 1.300 MW Reaktoren zu verwenden). Ein Teil des wiederaufgearbeiteten angereicherten Urans (REU-Kernbrennstoff) wurde bis 2016 in französischen Reaktoren verwendet, und EDF bereitet sich darauf vor, wieder etwas davon ab 2023 zu verwenden.

Im Laufe der Zeit sind in Frankreich große und komplexe Inventare von radioaktiven Abfällen angefallen. Während bereits Endlager für das meiste der kurzlebigen Abfälle betrieben werden, verzögern sich die Pläne zur Entwicklung eines Standorts für ein tiefeingeologisches Endlager für hoch- und mittelradioaktive, langlebige Abfälle durch technische Probleme und öffentlichen Widerstand.

³⁰⁸ RTE, „Bilan électrique 2018“, Réseau de Transport d'Electricité, Februar 2019.

³⁰⁹ World Nuclear News, „Weld repairs to delay Flamanville EPR start-up“, 20. Juni 2019, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Weld-repairs-to-delay-Flamanville-EPR-start-up>, Stand 22. August 2019.

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Die Klassifizierung von radioaktiven Abfällen in Frankreich entspricht den Empfehlungen der IAEO, allerdings werden einige spezifische Entwicklungen eingebracht. Die Klassifizierung basiert auf zwei Eigenschaften: Aktivität und Halbwertszeit. Die indikativen Schwellen basieren auf Masseaktivität und dem radioaktiven Zeitraum der wichtigsten langlebigen Radionuklide in den Abfällen. Es gibt drei Kategorien von Halbwertszeit und vier Kategorien von Aktivität, wie dies in Tabelle 10 aufgeführt ist. Im Vergleich zu den Richtlinien der IAEO führt diese Klassifizierung eine Unterscheidung zwischen lang- und kurzlebigen Abfällen für mittelradioaktive Abfälle (ILW) ein. Während die meisten anderen Länder erlauben, dass Teile der sehr schwachradioaktiven Abfälle (VLLW) in konventionellen Deponien entsorgt werden, gibt es keinen Ausnahmegrenzwert für VLLW in Frankreich. Die Kategorien sind dazu gedacht, Bezug zu nehmen auf spezifische, zweckgerichtete Management-Lösungen, von denen einige bereits in Betrieb sind, während andere sich noch im Forschungsstadium befinden.

TABELLE 10: Kategorien und Managementstatus von radioaktiven Abfällen in Frankreich – Stand 2018

		Langlebig	Kurzlebige	Sehr kurzlebige
	HALB-WERTZEIT	> 30 Jahre	≤ 30 Jahre > 100 Tage	≤ 100 Tage
HOCHRADIOAKTIVE ABFÄLLE (HLW)	> 10 ⁹ Bq/g	Wird untersucht (Art. 3 des Gesetzes von 2006) 1 Labor für tiefengeologische Endlagerung (Bure)		Management durch radioaktiven Zerfall
MITTEL-RADIOAKTIVE ABFÄLLE (ILW)	≤ 10 ⁹ Bq/g > 10 ⁶ Bq/g	Wird untersucht (Art. 3 des Gesetzes von 2006)	Oberflächen-entsorgung 1 geschlossene Anlage (CSM)	
SCHWACH-RADIOAKTIVE ABFÄLLE (LLW)	≤ 10 ⁶ Bq/g > 10 ² Bq/g	Studie zu fest zugeordneter unterirdischer Endlagerung (Art. 4 des Gesetzes von 2006)	1 Anlage in Betrieb (CSA)	
SEHR SCHWACH-RADIOAKTIVE ABFÄLLE (VLLW)	≤ 10 ² Bq/g	Zugeordnete Oberflächenentsorgung 1 Anlage in Betrieb (Morvilliers)		

Quelle: ANDRA Nationale Bestände an radioaktiven Materialien und Abfällen (2019).

Anmerkungen: ILW/LLW-Oberflächenendlagerung beinhaltet keine speziellen Abfallstoffe, z.B. mit Tritium kontaminiert; für diese Abfälle wird das Management noch untersucht.

CSA = Endlager „Centre de stockage de l'Aube“ (Soulaines-Dhuys);

CSM = Endlager „Centre de stockage de la Manche“ (La Hague).

SONSTIGE RADIOAKTIVE MATERIALIEN, DIE NICHT ALS ABFÄLLE KLASSIFIZIERT SIND

Gemäß einem Gesetz von 2006 über das Management von Radioaktiven Abfällen werden radioaktive Substanzen „für die eine weitere Verwendung geplant oder avisiert ist“ als radioaktive „Materialien“ betrachtet und nicht als Abfälle definiert.³¹⁰ Eine Absichtserklärung der Industrie zur Verwendung einer Substanz reicht aus, um diese als ein „Material“ zu klassifizieren, selbst wenn es keinen präzisen oder realistischen Plan gibt, dieses zu verwenden. Deshalb werden alle Arten von Brennelementen, von abgetrenntem Plutonium, von wiederaufgearbeitetem Uran und von angereichertem Uran nicht als Abfälle betrachtet und sind nicht in den obenstehenden Kategorien enthalten. Die Möglichkeit, dass einige dieser Materialien in Zukunft nicht wiederverwendet werden, hat dazu geführt, dass im Jahr 2016 ein Gesetz erlassen wurde.³¹¹ Dieses Gesetz erlaubt es der französischen Regierung, die Qualifizierung eines radioaktiven „Materials“ auf radioaktiven Abfall abzuändern, wenn die Empfehlung von der Sicherheitsbehörde ASN gegeben wird. Diese Option ist bis jetzt noch nicht genutzt worden.

³¹⁰ Französische Regierung, „Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs“, 28. Juni 2006.

³¹¹ Französische Regierung, „Ordonnance n° 2016-128 du 10 février 2016 portant diverses dispositions en matière nucléaire“, Artikel 14, 10. Februar 2016.

Gasförmige und flüssige radioaktive Stoffe sind nicht in dem Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle enthalten. Diese fallen in diversen Schritten bei der Produktion von Nuklearanlagen (größtenteils in den Wiederaufbereitungsanlagen von La Hague) an und werden durch Verdünnung in die Umgebung entsorgt (nach einem Lagerzeitraum für den Zerfall für einige von ihnen).

ABFALLMENGEN

Die ANDRA veröffentlicht alle drei Jahre ein Inventar von radioaktiven Materialien und Abfällen. Die letzte umfangreiche Aufstellung wurde 2018 veröffentlicht und führte die entsprechenden Daten für Ende 2016 auf. Eine summarische Aktualisierung von 2019 macht Angaben für einige Kategorien mit Stand Ende 2017.

Per Dezember 2017 hat die ANDRA folgende Schätzungen vorgenommen: 3.740 m³ hochradioaktiver Abfälle (HLW), 42.800 m³ mittelradioaktive, langlebige Abfälle (ILW-LL), 93.600 m³ schwachradioaktive, langlebige Abfälle (LLW-LL), 938.000 m³ schwach- und mittelradioaktive, kurzlebige Abfälle (LILW-SL) und 537.000 m³ sehr schwachradioaktive Abfälle (VLLW). Darüber hinaus waren 1.770 m³ Abfälle in keiner der Kategorien enthalten. Detaillierte Informationen sind in der [Tabelle 11](#) enthalten.

Die durch die ANDRA zur Verfügung gestellten Informationen beinhalten ausländische radioaktive Abfälle, wenn diese auf französischem Territorium gelagert sind. Dies bezieht sich hauptsächlich auf Verträge mit ausländischen Kunden zur Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen. Feststoffabfälle, die bei dieser Wiederaufarbeitung anfallen, müssen in die Ursprungsländer zurücktransportiert werden, weil es die französischen Gesetze verbieten, radioaktive Abfälle mit ausländischer Herkunft auf dem eigenen Staatsgebiet endzulagern. Allerdings erfolgt ein Austausch zwischen den verschiedenen Arten von Abfällen, um die zu versendenden Volumen zu minimieren. Dieser Austausch kann außerdem problematische Abfallformen umgehen (z.B. bituminierte mittelradioaktive Abfälle), die von den ausländischen Wiederaufarbeitungskunden nicht angenommen wurden. Darüber hinaus haben die Aktivitäten in der Vergangenheit und die momentanen Aktivitäten in Bezug auf radioaktive Materialien mit ausländischem Ursprung Abfälle (z.B. unbestrahlte Kernbrennstoffe für Brüter) und „wiederverwendbare Materialien“ (z.B. wiederaufgearbeitetes Uran) produziert, welche keine tatsächliche Verwendung haben, die aber jetzt zulasten von Frankreich aufgeführt werden.

HLW fällt fast ausschließlich bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen an. Per Ende 2018 wurden mehr als 34.000 tHM französische und ausländische Brennelemente in La Hague wiederaufgearbeitet. Die meisten hieraus resultierenden HLW-Abfälle, mindestens 95 Prozent, werden zu verglasten Abfallbehältern konditioniert. Ein geringer Teil wird zum Abkühlen in Tanks bis zur Verglasung gelagert.

Für ILW-LL stellt sich die Situation verhältnismäßig heterogen dar: Einige der Abfälle sind für die Endlagerung konditioniert, während andere vorkonditioniert sind oder sich noch im Rohzustand befinden. Diese Abfälle können in Metallfässern, in Schlämmen oder anderen Rohformen zementiert, bituminiert, verglast oder betoniert werden. Allerdings müssen einige der alten Behälter oder Schlämme vor deren erneuter Konditionierung charakterisiert werden. Eine große Menge an bituminierten, entzündlichen Abfallbehältern stellen eine besondere Herausforderung an die erneute Konditionierung dar.

TABELLE 11: Radioaktive Abfälle in Frankreich – Stand Dezember 2017

Abfallart	Art der Lagerung	Lagerstandort	Menge
SNF (HLW)	Zwischenlagerung (nass)	Standorte von Atomkraft-werken (ein Becken pro Reaktor)	4.040 tHM
	Zwischenlagerung (nass)	La Hague	9.788 tHM*
	Zwischenlagerung (nass)	Creys-Malville**	106 tHM
	Zwischenlagerung (teilweise nass, teilweise trocken)	CEA-Standorte	55 tHM
HLW	Zwischenlagerung	La Hague, Marcoule, CEA-Standorte	3.740 m ³
ILW-LL (AUS DER SNF WIEDERAUFARBEITUNG)	Zwischenlagerung	AKW-Standorte, La Hague, Marcoule, CEA-Standorte, Forschungszentren, Bouches-du-Rhone	42.800 m ³
LLW-LL	Zwischenlagerung	AKW-Standorte, La Hague, Marcoule, CEA- Standorte, Forschungszentren, Le Bouchet	93.600 m ³
TRITIUMHALTIGE ABFÄLLE	Zwischenlagerung	Côte D'Or	5.640 m ³
LILW-SL	Zwischenlagerung	AKW-Standorte, Wiederaufarbeitungsanlagen, Marcoule, Forschungszentren, Urananreicherungsanlagen	85.400 m ³
	Entsorgte Abfälle	Geschlossenes oberirdisches Endlager (CSM)	527.000 m ³
	Entsorgte Abfälle	In Betrieb befindliches oberirdisches Endlager (CSA)	326.000 m ³
ABFÄLLE OHNE KLASSIFIZIERUNG		Standort nicht benannt	1.770 m ³
VLLW	Zwischenlagerung	Wiederaufarbeitungsanlagen	185.000 m ³
	Entsorgte Abfälle	In Betrieb befindliches oberirdisches Endlager (CIRES)	352.000 m ³
URANHALTIGE ABFÄLLE	Halden und Schlamm- absetzbecken		50 Millionen Tonnen
RADIOAKTIVE QUELLEN AUSSER BETRIEB***			1.700.000 m ³
GESCHÄTZTE ZUKÜNFTIGE ABFÄLLE	HLW: 12.000 m ³ ; ILW-LL: 72.000 m ³ ; LLW-LL: 190.000 m ³ ; LILW-SL: 2.000.000 m ³ ; VLLW: 2.300.000 m ³		

Quelle: Eigene Aufstellung basierend auf ANDRA (2018) und Französische Regierung (2017).

Anmerkungen: * beinhaltet 30 tHM SNF aus dem Ausland;

**Creys-Malville lagert außerdem 70 tHM unbestrahlten Kernbrennstoff, ursprünglich für Superphénix;

***per Ende 2015; CEA = Kommission für Atomenergie und Alternative Energien
(Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives);

CSA = Endlager „Centre de stockage de l'Aube“ (Soulaines-Dhuys);

CSM = Endlager „Centre de stockage de la Manche“ (La Hague);

CIRES = Industrieanlage zur Zusammenführung, Zwischenlagerung und Endlagerung
„Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage“ (Morvilliers)

Die geschätzten zukünftigen Abfälle in Tabelle 11 sind die Menge, die durch die 58 in Betrieb befindlichen Reaktoren und damit verbundenen Anlagen gemäß ANDRA produziert werden, und zwar unter den folgenden Annahmen:

- Die existierenden Reaktoren werden für 50 bis 60 Jahre in Betrieb sein;
- alle abgebrannten Brennelemente (einschließlich MOX) werden wiederaufgearbeitet;
- alle „wiederverwendbaren“ radioaktiven Materialien werden in den bestehenden oder zukünftigen Reaktoren verwendet, sodass es keine Änderung in deren Klassifizierung gibt (aber Abfälle, die sich aus dieser hypothetischen Verwendung ergeben, sind nicht enthalten);

Im Vergleich zu den bis jetzt existierenden Mengen sind die zukünftigen Mengen weitaus größer. Es wird erwartet, dass sich HLW verdreifacht, ILW-LL um den Faktor 1,7 erhöht, LLW-LL und LILW-SL verdoppeln und VLLW um mehr als das Vierfache erhöhen würde.

SONSTIGE NICHT ALS ABFALL KLASSIFIZIERTE RADIOAKTIVE MATERIALIEN

Der Betrieb der Anlagen der Brennstoffkette und die Wiederaufarbeitungsstrategie haben mittlerweile große Mengen an Materialien produziert, die als wiederverwendbar erklärt wurden. Gemäß dem ANDRA-Inventar³¹² hat Frankreich zum Ende des Jahres 2017 Folgendes gelagert:

- 14.189 tHM abgebrannte Brennelemente, meistens aus den PWR-Reaktoren und zusätzlich aus anderen Reaktortypen, die jetzt abgeschaltet sind (ohne abgebrannte Brennelemente aus den Aktivitäten der Nationalen Verteidigung; diese Menge betrug 194 tHM). Diese Lagermenge erhöht sich jedes Jahr, weil die aus den Reaktoren entladenen Mengen die Mengen um ungefähr 20 Prozent übersteigen, die in La Hague wiederaufgearbeitet werden (typischerweise gemäß neuesten Durchschnittswerten 1.200 tHM zu 1.000 tHM);
- 315.000 tHM abgereichertes Uran, das größtenteils in Tricastin und Bessines gelagert ist;
- 30.500 tHM wiederaufgearbeitetes, in Tricastin und in La Hague gelagertes Uran; hiervon befanden sich zum Ende des Jahres 2016 2.700 tHM im Besitz anderer Staaten. In der Vergangenheit hat Frankreich die Verantwortung für große Teile des ausländischen wiederaufgearbeiteten Urans übernommen, wobei ein Teil hiervon nach Russland zur Lagerung oder Wiederanreicherung versandt wurde; und
- 54 tHM abgetrenntes Plutonium.

Obwohl sich die Menge an UOX-Brennelementen in den vergangenen Jahren erhöht hat, bestand die Erhöhung der Gesamtmenge der abgebrannten Brennelemente hauptsächlich aufgrund von MOX-Brennelementen aus wiederaufgearbeitetem, angereichertem Uran (REU); beide Brennelementtypen werden nicht wiederaufgearbeitet. Zum Ende des Jahres 2017 betrug der Bestand an abgebrannten MOX-Brennelementen 1.910 tHM und 578 tHM an abgebrannten REU-Brennelementen.

³¹² ANDRA, „Inventaire national des matières et déchets radioactifs – Les Essentiels 2019“, Agence National pour la Gestion des Déchets Radioactifs, März 2019.

Gemäß Regierungsangaben betragen die gesamten Bestände an nicht-bestrahltem Plutonium – einschließlich abgetrenntem Plutonium und nicht-bestrahlter sowie plutoniumhaltiger unbestrahlter Brennstoffe und Abfälle – 65,4 Tonnen zum Ende des Jahres 2016.³¹³ Dieser Lagerbestand an Plutonium erhöht sich durchschnittlich um mehr als eine Tonne pro Jahr, trotz der Zusicherungen der Regierung, eine Politik des “Gleichgewichts der Materialströme“ zu verfolgen, die darauf abzielt, kein nicht-bestrahltes Plutonium anzuhäufen. Der Hauptgrund für die Erhöhung in den vergangenen Jahren war die Lagerung von Abfällen aus der Produktion von MOX-Brennelementen mit einem hohen Plutoniumgehalt. Außerdem lagerten zum Ende des Jahres 2016 16,3 Tonnen Plutonium in Frankreich, die ausländischen Organisationen gehören.

Schließlich hat der Betrieb der Uranminen in Frankreich bis 2001 zu der Ansammlung von ungefähr 50 Millionen Tonnen Uran-Tailings geführt. Diese wurden an 16 Standorten gelagert, zuzüglich ungefähr 200 Millionen Tonnen Abfallgestein an diversen Abbaustandorten.

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

Über Jahrzehnte hinweg hat die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen die Politik des Landes in Bezug auf das Management von radioaktiven Abfällen und Materialien geformt; dies hat zu einem sehr komplexen System an Anlagen und Vorschriften geführt.

Der Rechts- und Vorschriftenrahmen Frankreichs für das Management von radioaktiven Abfällen wurde Jahrzehnte, nachdem diese Abfälle angefallen sind, entwickelt. Ein anfängliches Gesetz über die Forschung zum Management von radioaktiven Abfällen trat im Jahre 1991 in Kraft.³¹⁴ Mit dem Gesetz über das Nachhaltige Management von Radioaktiven Materialien und Abfällen³¹⁵ erfolgte der erste umfassende Ansatz im Jahre 2006. Dieser legte einen Nationalen Plan für das Management von Radioaktiven Materialien und Radioaktiven Abfällen (Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs oder PNGMDR) fest, der regelmäßige Diskussionen dieser Strategie in einer pluralistischen Arbeitsgruppe beinhaltet, sowie die regelmäßige Veröffentlichung eines gemeinsamen Dreijahresberichts durch ASN und die Regierung und des weiteren die regelmäßige Aktualisierung einer Regierungsverordnung, die die Empfehlungen des Berichts in rechtliche Anforderungen gegenüber den Betreibern umsetzt.³¹⁶

Die Strategie der Wiederaufarbeitung führte zu der Anhäufung von abgebrannten Brennelementen und diversen radioaktiven Materialien (wie abgetrenntes Plutonium und wiederaufgearbeitetes Uran). Während diese Bestände dank ihres „wiederverwendbar“ Status den Druck auf die Endlagerungssysteme für radioaktive Abfälle mindern, erhöhen sie den Druck auf die für sie bestimmten Zwischenlagerkapazitäten. Ungefähr ein Drittel der abgebrannten Brennelemente aus den PWR-Reaktoren wird in Abklingbecken an den Kraftwerksstandorten gelagert, während zwei Drittel in Lagerbecken in La Hague gelagert werden. Diese werden voraussichtlich spätestens bis zum Jahre 2030 voll sein; dies ist eine Situation, die den Betrieb der Reaktoren gefährden könnte. Deshalb plant EDF den Bau eines neuen zentralen Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente mit einer Kapazität von 10.000 tHM an einem ihrer Kraftwerksstandorte. Dieses Becken wäre darauf ausgelegt, über ein Jahrhundert hinweg in Betrieb zu sein.

³¹³ IAEO, „Communication Received from France Concerning Its Policies Regarding the Management of Plutonium—Statements on the Management of Plutonium and High Enriched Uranium“, INFCIRC/549/Add.5/21, 29. September 2017.

³¹⁴ Französische Regierung, „Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs“, Gesetz Nr. 91-1381, 30. Dezember 1991, *Journal Officiel de la République Française* Nr. 1, 1. Januar 1992.

³¹⁵ Französische Regierung 2006, „Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs“, Gesetz Nr. 2006-739, 28. Juni 2006.

³¹⁶ Siehe neuester PNGMDR – Nationalplan Frankreichs zum Management von radioaktiven Materialien und Abfällen für 2016-2018: <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/PNGMDR%202016-2018.pdf>.

Die Option für eine Trockenlagerung in Behältern für abgebrannte Brennelemente wurde aufgegeben. Langlebige radioaktive Abfälle sammeln sich auch in Zwischenlagern an, hauptsächlich in La Hague, wo die meisten HLW- und ILW-LL-Abfälle anfallen, und in Marcoule, wo sich das zweitgrößte Inventar befindet. Kurzlebige radioaktive Abfälle sind die einzige Art radioaktiver Abfälle, für die bereits ein Endlager existiert. LILW-SL wurde bis zum Jahr 1994 zu dem oberflächennahen Endlager Centre de stockage de la Manche (CSM) transportiert. Diese Anlage ist jetzt mit über 527.000 m³ Abfall geschlossen; hiervon stammen fast zwei Drittel aus dem Atomenergiesektor. LILW-SL wird jetzt zu dem oberflächennahen Endlager Centre de stockage de l'Aube (CSA) gebracht. Dessen Kapazität von 1 Millionen m³ war Ende 2017 zu 33 Prozent ausgelastet. VLLW-SL wurde seit 2003 zu der Industrieanlage zur Zusammenführung, Zwischenlagerung und Endlagerung mit dem Namen „Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES)“ in Morvilliers transportiert. 54 Prozent der Kapazität dieser Anlage von 650.000 m³ waren bis zum Ende des Jahres 2017 ausgelastet.

Für LLW-LL hat das Gesetz von 2006 über das Management von Radioaktiven Abfällen das Prinzip des zweckbestimmten oberflächennahen Endlagers eingeführt, dessen Betriebsbeginn für 2013 geplant war. Aufgrund technischer Probleme und Fragen der Akzeptanz vor Ort wurde das Projekt auf Eis gelegt. Die oberflächennahe Endlagerung wird untersucht, aber über die Management-Strategie ist bis jetzt noch nicht entschieden worden (Anzahl der Standorte, Ort, technologisches Konzept). Solange bis ein Endlager zur Verfügung steht, wird LLW-LL hauptsächlich an den Produktionsstandorten gelagert.

Ein tiefengeologisches Endlager unter dem Namen CIGEO ist für HLW und ILW-LL als die Lösung geplant, wie sie durch das Gesetz von 2006 für deren Endlagerung festgelegt wurde. Die Hauptmenge von HLW ist in La Hague (85 Prozent) gelagert; der Rest in Marcoule. ILW-LL ist hauptsächlich in La Hague (44 Prozent), in Marcoule (34 Prozent) und Cadarache (16 Prozent) gelagert. Der Baubeginn der CIGEO-Anlage ist für 2022 geplant.

Der Standort wurde in den 1990er Jahren ausgewählt, als der kleine Ort Bure im Nordosten Frankreichs als Standort für ein Untertage-Labor zur Untersuchung der vor Ort bestehenden Tonstruktur ausgewählt wurde; und im Jahre 1999 wurde die Genehmigung erteilt.³¹⁷ Das Gesetz von 1991 über die Forschung zum Management von Radioaktiven Abfällen schlägt vor, dass noch ein weiteres Labor die Genehmigung zu genehmigen um Granitvorkommen zu untersuchen. Aufgrund des örtlichen Widerstands an potentiellen Standorten wurde diese Option aufgegeben. Im Jahre 2010 hat die ANDRA ein „Interessensgebiet“ für eine weitere, tiefergehende Exploration (ZIRA) um Bure herum definiert; der genaue Standort von CIGEO wurde ein paar Jahre später entschieden.³¹⁸ Eine erste industrielle Pilotphase soll dem Vollast Betrieb der untertägigen Einlagerung vorhergehen. Damit soll ein definierter Grad an Rückholbarkeit und Reversibilität für mindestens ein Jahrhundert garantiert werden.³¹⁹ Die Einlagerung würde bis ungefähr 2150 stattfinden; zu dem Zeitpunkt soll das Endlager geschlossen und anschliessend für Jahrhunderte überwacht werden.³²⁰

³¹⁷ Französische Regierung, „Décret du 3 août 1999 autorisant l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs à installer et exploiter sur le territoire de la commune de Bure (Meuse) un laboratoire souterrain destiné à étudier les formations géologiques profondes où pourraient être stockés des déchets radioactifs“, Verordnung des 3. August. 1999, *Journal Officiel de la République Française* Nr. 180, 6. August 1999.

³¹⁸ ANDRA, „Stockage réversible profond—Proposition d'une Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface“, Agence National pour la Gestion des Déchets Radioactifs, September 2010, <https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/391.pdf>, Stand 25 Juli 2020.

³¹⁹ Französische Regierung 2016, „Loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue“, Gesetz Nr. 2016-1015 vom 25. Juli 2016, *Journal Officiel de la République Française* Nr. 0172, 26 Juli 2016.

³²⁰ ANDRA, „Les différentes phases du projet“, ANDRA Webseite, o.D., <https://www.andra.fr/cigeo/les-installations-et-le-fonctionnement-du-centre/les-differentes-phases-du-projet>, Stand 22. Februar 2019.

Die radioaktiven Abfälle mit der höchsten Wärmeentwicklung müssen Jahrzehnte zur abkühlen, bevor sie in das Endlager CIGEO eingelagert werden können. Technische Verzögerungen könnten sich außerdem in Bezug auf Fragen wie Feuerrisiko im Zusammenhang mit Tausenden von Tonnen von bituminierten Abfällen aus der ersten Zeit der Wiederaufarbeitung ergeben. Diese Verzögerungen könnten die geplante Betriebszeit der existierenden HLW- und ILW-LL-Lager überschreiten. Es gibt bis jetzt noch keine Pläne, diese Lager entsprechend zu verstärken oder zu ersetzen.

Einige der „wiederverwendbaren Materialien“ erfordern eventuell eine erneute Qualifizierung als Abfälle, weil es faktisch keine Wiederverwendung gibt; allerdings wird deren Management weder bei der momentanen Auslegung von CIGEO berücksichtigt, noch werden sie bei der Untersuchung anderer möglichen Optionen behandelt. Die Einbeziehung einiger dieser Materialien in das endzulagernde Inventar würde eine Weiterentwicklung der Auslegung von CIGEO erfordern und dessen Footprint erhöhen, und zwar potentiell bis zu den Grenzen der bisher in Betracht gezogenen geologischen Zone.

KOSTEN UND FINANZIERUNG

Die einzigen existierenden Schätzungen von detaillierten Kosten für das Management von radioaktiven Abfällen für Frankreich sind die Zahlen des Rechnungshofs (Cour des Comptes), die im Jahre 2012³²¹ veröffentlicht und im Jahre 2014³²² aktualisiert wurden; diese sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Gemäß Rechnungshof beliefen sich die in Bezug auf Nuklearaktivitäten geschätzten Bruttokosten für das Management von radioaktiven Abfällen zum Ende des Jahres 2013 auf € 32 Milliarden; hiervon entstanden 80 Prozent bei EDF, 11 Prozent bei Areva (jetzt Orano) und 9 Prozent bei der CEA.

TABELLE 12: Schätzungen der Bruttokosten für das Management von radioaktiven Abfällen in Frankreich – Stand 2013

BRUTTOKOSTEN, € MILLIONEN ₂₀₁₃	EDF	CEA	AREVA	ANDRA	GESAMT
LANGFRISTIGES ABFALL-MANAGEMENT	24.370	1.995	1.885	42	28.292
hiervon HLW und LL-ILW	21.981	1.626	1.154	1	24.762
LL-LLW	832	74	27	17	950
VLLW, SL-LLW und SL-ILW	1.557	295	704	24	2.580
KOSTEN NACH DER SCHLIEßUNG	1.208	411	42	42	1.703
RÜCKGEWINNUNG UND KONDITIONIERUNG (ALTBÄLLE)	0	512	1.541	—	2.053
GESAMT	25.578	2.918	3.468	84	32.048

Quelle: Cour des Comptes/Französischer Rechnungshof (2014).

Obwohl die existierenden Endlager für Abfälle der Kategorien VLLW und LILW-SL ungefähr ausreichen, um 90 Prozent des Volumens der Abfälle endzulagern, betragen die kombinierten Kosten der Endlager CIRCES, CSM und CSA nur € 2,6 Milliarden oder weniger als zehn Prozent der Gesamtkosten. Der Löwenanteil der projektierten Kosten bezieht sich auf die Endlagerung von langlebigen Abfällen (mehr als € 25 Milliarden) und auf die Rückholung und Konditionierung von alten radioaktiven Abfällen (ungefähr € 2 Milliarden). Beide Schätzungen sind äußerst unsicher. Obwohl die Regierung die Kosten für die Endlagerung von HLW und LL-ILW in CIGEO projektiert hat, um Rückstellungen in Höhe von € 25 Milliarden zu bilden, hat

³²¹ Cour des Comptes, „Die Kosten der Kernenergie“, Französischer Rechnungshof, Öffentlicher thematischer Bericht (auf Französisch, Deutsch und Englisch), Januar 2012, <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/les-couts-de-la-filiere-electro-nucleaire>, Stand 26. Juli 2020.

³²² Cour des Comptes, „Le coût de production de l'électricité nucléaire—Actualisation 2014“, Mitteilung an den Untersuchungsausschuss der Französischen Nationalversammlung, 27. Mai 2014.

dies nur willkürlich einen Streit über die stark variierenden Schätzungen zwischen den Betreibern und der ANDRA beigelegt.³²³

Darüber hinaus basiert diese Kostenschätzung auf einem zukünftigen Inventar unter der Annahme, dass alle abgebrannten Brennelemente wiederaufgearbeitet werden. Die Kostenschätzungen durch die ANDRA in der Vergangenheit haben gezeigt, dass die Einbeziehung von nicht-wiederaufgearbeitetem abgebranntem Uran und MOX-Brennelementen in dem in Betracht bezogenen Inventar zu mehr als einer Verdoppelung der geplanten Kosten von CIGEO führen könnte. Die momentane Schätzung der Bruttokosten für das Management der abgebrannten Brennelemente basiert auf einer geplanten Wiederaufarbeitung aller dieser Brennelemente. Das Gesetz über das Management von Radioaktiven Abfällen von 2006 hat festgelegt, dass die Betreiber den Behörden die erforderlichen Informationen in einem Bericht zur Verfügung stellen müssen, der alle drei Jahre aktualisiert werden muss. Die Vorschriften legen fest, dass zweckgebundene Vermögenswerte die Rückstellungen decken müssen, und zwar mit einem ausreichenden Niveau an Sicherheit, Diversität, Liquidität und Profitabilität.

In dem aktualisierten Bericht von 2014 hat der Rechnungshof angemerkt, dass die Rückstellungen, um diese zukünftigen Kosten in Bezug auf das zukünftige Management der Stilllegung und der radioaktiven Abfälle zu decken, mit einem Betrag von € 43,7 Milliarden zum Ende des Jahres 2013 berechnet wurden; hiervon waren € 11 Milliarden für das Management der radioaktiven Abfälle und € 10,1 Milliarden für das Management der abgebrannten Brennelemente vorgesehen. Für die abgebrannten MOX- und URE-Brennelemente von EDF basiert die Rückstellung auf der „vorsichtigen“ Annahme, dass diese nicht wiederaufgearbeitet, sondern in einem tiefengeologischen Endlager gelagert werden – eine Annahme, die nicht mit derjenigen Schätzung übereinstimmt, die für die Kosten von CIGEO gilt. Dank der verwendeten Diskontierungsraten betragen diese Rückstellungen – 75 Prozent hiervon werden durch EDF, 14 Prozent durch Areva (jetzt Orano) und 11 Prozent durch CEA getragen – ungefähr die Hälfte der geschätzten zukünftigen Kosten.

TABELLE 13: Rückstellungen für Stilllegung und Management von radioaktiven Abfällen in Frankreich – Stand 2013

RÜCKSTELLUNGEN, € MILLIONEN ₂₀₁₃	EDF	CEA	AREVA	ANDRA	GESAMT
Stilllegung	13.024	2.931	3.661		19.616
Management von abgebrannten Brennelementen	9.779	342			10.121
Abfallmanagement, hiervon	7.542	1.311	2.113	47	11.013
Rückholung und Wiederverpackung		432	1.240		1.672
Langfristiges Abfallmanagement	7.397	830	831	36	9.094
Kosten nach der Schließung von Abfalllagern	145	49	42	10	246
Letzte Reaktorkerne	2.313				2.313
Sonstige		152	483		635
GESAMT	32.658	4.736	6.258	47	43.699
Anteil	75 %	11 %	14 %		100 %
Rückstellungen/Bruttokosten	48 %	66 %	52 %	56 %	50 %

Quelle: Cour des Comptes/Französischer Rechnungshof (2014).

Anmerkung: Unterschiede in Gesamtsummen stammen aus Rundungen.

³²³ Französische Regierung, „Arrêté du 15 janvier 2016 relatif au coût afférent à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue“, Verordnung des 15. Januar 2016.

Kritiker argumentieren, dass die Rückstellungen zur Deckung der zukünftigen Kosten unzureichend sind und ein hohes Maß an Unsicherheiten schaffen. Die unabhängige Nationale Kommission für die Bewertung der Finanzierung der Gebühren für die Stilllegung von Atomanlagen und das Management von Abgebrannten Brennelementen und Radioaktiven Abfällen (CNEF) soll die Kontrolle der Betreiber durch die Regierung bewerten. Diese Kommission besteht aus Parlamentariern und Experten und soll alle drei Jahre einen Bericht veröffentlichen. Bis jetzt allerdings hat sie nur einen Bericht im Jahre 2012 erstellt.³²⁴ Dieser Bericht gibt an, dass der Regierung die Mittel fehlen, ihre Kontrolle auszuüben, dass die Bewertungen der Betreiber keinerlei Marge für Unsicherheiten bieten, dass die von den Behörden zur Verfügung gestellten Informationen nicht ausreichen, um die Regulierung der zweckgebundenen Vermögenswerte zu überprüfen; außerdem fand die CNEF es schwierig, ihre Fähigkeiten aufrecht zu erhalten aufgrund der niedrigen Arbeitsfrequenz.

ZUSAMMENFASSUNG

Das französische Atomprogramm wurde zuerst für militärische Zwecke entwickelt, aber hat sich schnell zu einem Pfeiler der französischen Energiepolitik gewandelt. Diese Politik hat zu dem Bau unzähliger Reaktoren und Atomanlagen geführt, bei denen die größten Bestände an radioaktiven Abfällen und Materialien in Europa angefallen sind. Die strategische Wahl eines Managementsystems auf der Grundlage der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen hat zu einem komplexen Bestand von Abfällen verschiedener Kategorien und von radioaktiven Materialien geführt; dies führt zu ständig wachsenden Mengen von mittelradioaktiven bis zu hochradioaktiven, langlebigen Abfällen in Zwischenlagern. Die meisten der historischen Entscheidungen in Frankreich wurden getroffen, bevor ein dezidiertes Rechts- und Aufsichtsrahmen eingeführt wurde. Dieser Prozess begann mit einem Gesetz über die Forschung zu dem Management von radioaktiven Abfällen im Jahre 1991 und wurde anschließend fortgesetzt mit dem Gesetz über das Management von radioaktiven Materialien und radioaktiven Abfällen im Jahre 2006. Seit diesem Zeitpunkt zielt die regelmäßige Aktualisierung eines Dreijahresplans darauf ab, eine Strategie auszuarbeiten und umzusetzen, die im Einklang mit diesem komplexen Erbe sein soll.

Die Endlager sind nur für einige Abfallkategorien in Betrieb (wie: sehr schwachradioaktive (VLLW), schwachradioaktive, kurzlebige (LLW-SL) und mittelradioaktive, kurzlebige Abfälle (ILW-SL)). Für alle anderen Kategorien fehlen Lösungen. Die Pläne für eine oberflächennahe Endlagerung für schwachradioaktive, langlebige Abfälle wurden auf Eis gelegt. Das Projekt einer tiefengeologischen Endlagerung für mittelradioaktive, langlebige Abfälle und hochradioaktive Abfälle sieht sich noch immer wichtigen technischen und politischen Hürden gegenüber. Darüber hinaus hat Frankreich noch keine Pläne zur Endlagerung der wachsenden Bestände an radioaktiven Materialien entwickelt (einschließlich Plutonium und wiederaufgearbeitetem und abgereichertem Uran); für diese besteht das Risiko, dass sie entweder gar nicht oder nur teilweise wiederverwendet werden.

Diese Situation übt einen wachsenden Druck auf die Kapazitäten und Laufzeiten der existierenden Lager aus; dies führt zu Verlängerungen, wie z.B. bei dem neuen Projekt eines zentralen Lagerbeckens für abgebrannte Brennelemente. Die momentan projektierten Kosten und zweckgebundenen Finanzmittel berücksichtigen diese Dinge nicht und werden deshalb höchstwahrscheinlich unzureichend sein. EDF, die den Löwenanteil der „back-end“ Kosten tragen soll, trägt gleichzeitig die Lasten von wachsenden Betriebskosten bei ihren alternden Reaktoren und eines „Investment Walls“ aufgrund des Fiaskos bei dem Bau des Flamanville-3 EPR Reaktors und einer rechtlichen Verpflichtung, den Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen.

³²⁴ CNEF, „Rapport de la Commission nationale d'évaluation du financement des charges de démantèlement des installations nucléaires de base et de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs“, 2012.

7.3 DEUTSCHLAND

ÜBERBLICK

Im Jahre 1955 haben sowohl die Bundesrepublik Deutschland (BRD) als auch die Deutsche Demokratische Republik (DDR) Atomforschungsprogramme aufgebaut. Die Bundesrepublik Deutschland hat ihr Atomprogramm in zwei parallelen Bereichen entwickelt: ein Programm zur Konstruktion von deutschen Reaktoren und ein weiteres Programm auf der Basis der Übernahme der US-amerikanischen Technologie. Der erste Leichtwasserreaktor wurde für das erste Atomkraftwerk VAK Kahl im Jahre 1956 bestellt. Zum Ende der 1980er Jahre befanden sich 19 Reaktoren in der Bundesrepublik in Betrieb; diese waren für ungefähr 30 Prozent der jährlichen Nettostromerzeugung des Landes verantwortlich.

In der Zwischenzeit wurde die DDR durch die Sowjetunion beliefert. Im Jahre 1966 wurde deren erster Pilotreaktor in Rheinsberg an das Stromnetz angeschlossen. Frühe Pläne der DDR-Regierung beinhalteten den Bau von 20 Atomkraftwerken bis 1970, jedoch wurden nur die fünf Blöcke in Greifswald gebaut.³²⁵ Im Jahre 1990 – mit der Wiedervereinigung – hat die deutsche Regierung entschieden, alle sowjetischen Reaktoren abzuschalten. Die Entscheidung wurde hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen getroffen: um den Betrieb gemäß dem neu anzuwendenden westdeutschen Atomenergiegesetz fortzusetzen, wäre eine große Zahl an Sicherheitsvorschriften umzusetzen gewesen.³²⁶

In den frühen 2000er Jahren hat die Koalition aus SPD und Bündnis 90/Die Grünen einen Konsens mit den Versorgungsunternehmen erzielt, Atomkraft aufzugeben. Die Vereinbarung wurde im Jahre 2002 zu einem Gesetz (das Atomausstiegsgesetz) und hat die Betriebszeit der Reaktoren auf ungefähr 32 Jahre begrenzt (in Äquivalenz zur Stromerzeugung/Zuweisungen von Kilowattstunden). Das Gesetz hat den Bau von neuen Atomkraftwerken komplett verboten.³²⁷ Im Herbst 2010 hat die Koalition aus CDU/CSU und FDP den Ausstieg widerrufen und die Betriebszeiten der Reaktoren – je nach Reaktortyp – um 8 bis 14 Jahre verlängert. Allerdings haben diese Verlängerungen weniger als ein Jahr Bestand gehabt. Im Jahre 2011, drei Monate nach dem Unfall von Fukushima, hat das Parlament mit einer breiten Unterstützung des gesamten politischen Spektrums das Atomenergiegesetz (AtG) angenommen, um unverzüglich die Betriebsgenehmigungen von 8 Reaktoren zu widerrufen. Die verbliebenen 9 Atomkraftwerke müssen bis zum Jahre 2022 abgeschaltet werden.

Bis 2019 waren nur drei verhältnismäßig kleine Reaktor-Prototypen bis zur „grünen Wiese“ vollständig zurückgebaut. Zwei große Atomkraftwerke wurden fast komplett rückgebaut, aber keiner der Standorte kann bis jetzt aus dem Kontrollbereich der Aufsichtsbehörden freigegeben werden, weil noch immer radioaktive Abfälle in Teilen der Gebäude gelagert sind.³²⁸

Im Gegensatz zu Ostdeutschland wurde in Westdeutschland kein Uran abgebaut. Allerdings existiert eine Urananreicherungsanlage in Gronau und eine Brennelementfabrik in Lingen. Gronau wird von einer Tochtergesellschaft der URENCO Ltd. betrieben. Ein Drittel der Anteile an dieser Firma werden von den deutschen Versorgungsunternehmen PreussenElektra und RWE, ein Drittel von der britischen Regierung und ein Drittel von der niederländischen Regierung gehalten. In Lingen stellt Framatome (durch deren Tochtergesellschaft Advanced Nuclear Fuels GmbH) Brennelemente sowie Pulver und Pellets zur

³²⁵ Anne M. Jonas, „Atomic Energy in Societ Bloc Nations“, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 1. November 1959.

³²⁶ Stefan Thierfeldt und Frank Schartmann, „Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen“, November 2009, Brenk Systemplanung im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

³²⁷ Kerstine Appunn, „The history behind Germany's nuclear phase-out“, *Clean Energy Wire*, 2. Januar 2018, <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/history-behind-germanys-nuclear-phase-out>, Stand 9. Januar 2019.

³²⁸ Mycle Schneider, Antony Froggatt et al., „World Nuclear Industry Status Report 2018“, September 2018, op. cit.

Lieferung an alle Brennelementfabriken von Framatome her. In den 1970er Jahren bestanden Pläne für ein komplexes Entsorgungszentrum für radioaktive Materialien in Gorleben, einschließlich einer Wiederaufarbeitungsanlage für abgebrannte Brennelemente, von Produktionsanlagen für Brennelemente und von Anlagen für alle Arten von Abfällen, einschließlich eines Salzstocks für die tiefegeologische Endlagerung. Die meisten dieser Pläne wurden auf Eis gelegt und später aufgegeben. Die langandauernde oberirdische und unterirdische Exploration (beginnend im Jahre 1979 bzw. 1986) des Salzstocks und dessen Entwicklung zu einem Pilotbergwerk hat – zusammen mit der Anhäufung von hochradioaktivem Inventar in dem dortigen Zwischenlager – Gorleben nichtsdestoweniger zu einem zentralen Management-Standort für radioaktive Abfälle gemacht.

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Die Grundstruktur des deutschen Klassifizierungssystems ist relativ einfach. Radioaktive Abfälle werden entsprechend der wärmeentwickelnden Eigenschaften in nur zwei Kategorien klassifiziert:

- wärmeentwickelnde Abfälle,
- und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

Die erste Kategorie entspricht weitestgehend der IAEO-Kategorie von hochradioaktiven Abfällen (HLW), einschließlich der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen und den abgebrannten Brennelementen selbst. Die zweite Kategorie ist essentiell eine Kombination der IAEO-Kategorien für mittelradioaktive Abfälle (ILW) und schwachradioaktive Abfälle (LLW). Allerdings werden einige der wärmeentwickelnden Abfälle gemäß der IAEO-Kategorie als ILW betrachtet. Einige Arten der sehr schwach radioaktiven Abfälle (VLLW) überschreiten bereits die momentanen deutschen Freigabewerte für konventionelle Deponien. Deshalb müssen die letztgenannten Abfälle in ein tiefegeologisches Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung verbracht werden.³²⁹

Die deutsche Politik ist darauf ausgerichtet, beide Kategorien radioaktiver Abfälle in tiefegeologischen Endlagern zu lagern, allerdings an unterschiedlichen Standorten, die unterschiedlich ausgelegt sein müssen.

ABFALLMENGEN

Deutschland hat eine Hinterlassenschaft von großen Mengen an radioaktiven Abfällen, die sich momentan in Zwischenlagern befinden; hierbei handelt es sich um zentrale Zwischenlager und um Zwischenlager an den Reaktorstandorten. Nach Frankreich und Großbritannien hat Deutschland das größte Volumen an Abfällen in Westeuropa. Alle nachstehenden Angaben stammen aus der letzten Bestandsaufnahme, die die Abfallmengen und Aktivität per 1. April 2016 auflisten. [Tabelle 14](#) zeigt die Gesamtvolumina und –massen der radioaktiven Abfälle.

³²⁹ Deutsche Bundesregierung, „Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle—Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungs-konferenz im Mai 2018“, 30. August 2017.

Wärmeentwickelnde Abfälle: Bis jetzt sind 15.155 tHM abgebrannter Brennelemente (SNF) angefallen. Die Hälfte hiervon wurde zur Wiederaufarbeitung versandt, wovon 327 Tonnen „ohne Rückgabe exportiert“ wurden, und die andere Hälfte befindet sich in Zwischenlagern (3.609 t befinden sich noch in Nasslagern in den Abklingbecken an den Reaktorstandorten). Darüber hinaus werden 577 m³ aus der Wiederaufarbeitung momentan größtenteils an den Reaktorstandorten gelagert. Es existieren noch 26 Behälter mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung, die in Frankreich und Großbritannien lagern. Die deutschen Bundesländer Schleswig-Holstein, Baden-Württemberg, Hessen und Bayern haben zugestimmt, diese Behälter zu übernehmen. Deutschland erwartet, dass ungefähr 27.000 m³ wärmeentwickelnde Abfälle in einem tiefeingeologischen Endlager gelagert werden.

Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung: Ungefähr 120.000 m³ sind in unterschiedlichen Formen landesweit gelagert; dies beinhaltet nicht die ungefähr 21.000 Tonnen von Rohabfällen und vorbehandelten Abfällen, die bis jetzt in keiner Art und Weise konditioniert (d.h. Abfälle in ihrer Ursprungsform) und an den Standorten der Produzenten gelagert sind. Alle Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung müssen im Lager Konrad endgelagert werden; dieses Lager hat eine Kapazität von 303.000 m³. Die gelagerten Abfälle werden entsprechend ihrem Verarbeitungsstatus aufgeteilt. Ungefähr 100.000 m³ der Abfälle wurden in Konrad-Containern konditioniert; diese verfügen über die Genehmigung zur Lagerung in dem Endlager Konrad. Eine zusätzliche Menge von 3.000 m³ wurde einer Produktkontrolle unterzogen. Ungefähr 24.000 m³ sind in den Zentralen Zwischenlagern (Gorleben, Mitterteich, Greifswald und Ahaus) gelagert.

Zusätzlich zu den großen Mengen an Abfällen in Zwischenlagern hat Deutschland außerdem bereits LILW in zwei tiefeingeologischen Endlagern gelagert. In Morsleben (Sachsen-Anhalt, 1971 – 1991 und 1994 – 1998) wurden 37.131 m³ gelagert. Ungefähr 47.000 m³ wurden in Asse II (Niedersachsen, 1967 – 1978) gelagert. Allerdings verliert das unter Druck stehende Salz seine Stabilität, und Grundwasserzuflüsse machen eine weitere Trockenlagerung unmöglich. Der Standort droht einzustürzen, ein „Worst-Case-Szenario“ für ein tiefeingeologisches Endlager. Im Jahre 2010 wurde die vollständige Rückholung der geschätzten 220.000 m³ einer Mischung aus radioaktiven Abfällen und Salz angekündigt, allerdings hat sich in der Praxis herausgestellt, dass es eventuell technisch nicht möglich sein wird, alle Abfälle zurückzuholen. Bis zum heutigen Tage hat es noch keine Entscheidung über die Endlagerungsstrategie gegeben, und es wurde noch keine Rückholung begonnen. Eine Option ist die Endlagerung der Abfälle in dem zukünftigen tiefeingeologischen Endlager für HLW, wenn dies technisch möglich ist. Das teuerste Szenario würde die Suche nach einem dritten tiefeingeologischen Endlager und der Bau eines solchen sein.

TABELLE 14: Radioaktive Abfälle in Deutschland – Stand 31. Dezember 2016

Abfallart	Art der Lagerung	Lagerstandort	Menge
SNF (HLW)	Zwischenlagerung (trocken)	Lager an den Standorten der Atomkraftwerke	4.201 t
	Zwischenlagerung (trocken)	ZLN, Ahaus, Gorleben	675 t
	Zwischenlagerung (nass)	Reaktor-Lagerbecken an den Atomkraftwerksstandorten	3.609 t
	SNF zur Wiederaufarbeitung versandt	851 t nach Großbritannien versandt; 5.393 t nach Frankreich versandt; 14 t nach Belgien versandt; 85 t in Karlsruhe, Deutschland wiederaufgearbeitet.	6.343 t
	SNF exportiert ohne Rücknahme	283 t VVER-Kernbrennstoff nach Russland versandt; 17 t nach Schweden versandt; 27 t VVER-Kernbrennstoff zur Wiederverwendung in Ungarn	327 t
HLW	Zwischenlagerung	Atomkraftwerksstandorte, ZLN, oberirdische Lagereinrichtungen, Zentrale Zwischenlager	577 m ³
LILW*	Zwischenlagerung	Atomkraftwerksstandorte	14.631 m ³
	Zwischenlagerung	Unterweser	1.422 m ³
	Zwischenlagerung	Gorleben	6.979 m ³
	Zwischenlagerung	Mitterteich	8.200 m ³
	Zwischenlagerung	ZLN Greifswald	6.830 m ³
	Zwischenlagerung	Stade	4.403 m ³
	Zwischenlagerung	Forschungseinrichtungen	61.965 m ³
	Zwischenlagerung	Oberirdische Lagereinrichtungen	1.108 m ³
	Zwischenlagerung	Ahaus	1.633 m ³
	Zwischenlagerung	GNS-Standorte und andere Lagereinrichtungen, Daher Nuclear Technologies, Atomindustrie	13.160 m ³
	Geschlossenes tiefengeologisches Endlager	Asse II	47.000 m ³
	Geschlossenes tiefengeologisches Endlager	Morsleben	37.131 m ³
VLLW	n.z.		
URANHALTIGE ABFÄLLE	Deponien und Schlammabsetzanlagen	Wismut (in Rekultivierung)	48 Halden mit schwachradioaktivem Gestein von ca. 311 Millionen m ³ , vier Absetzteiche mit ca. 160 Millionen m ³ radioaktiver Schlämme

Quelle: Eigene Aufstellung basierend auf Angaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2018).

Anmerkung: *beinhaltet nicht 21.000 t Rohabfälle und vorbehandelte Abfälle.
ZLN = Zwischenlager Nord; GNS = Gesellschaft für Nuklear-Service.

Mit den festgelegten Daten für das Abschalten aller Atomkraftwerke verfügt Deutschland über ein höheres Maß an Sicherheit in Bezug auf die erwarteten Mengen von wärmeentwickelnden Abfällen. Insgesamt 27.000 m³ wärmeentwickelnde Abfälle müssen in ein Endlager überführt werden.³³⁰ Darüber hinaus führt der sechste deutsche National Bericht gemäß des Gemeinsamen Übereinkommens eine grobe Schätzung für den Anfall von Betriebsabfällen in einer Größenordnung von 45 m³ mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung pro Jahr und Reaktor sowie eine geschätzte Menge an radioaktiven Abfällen aus der Stilllegung pro Reaktor von ungefähr 5.000 m³ Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung an.

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

Das Atomausstiegsgesetz von 2002 hat die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen im Ausland zum Juni 2005 hin beendet. Eine wissenschaftliche Arbeitsgruppe (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte oder AkEnd) wurde durch die Regierung eingesetzt, um Empfehlungen für ein kriterien-basiertes, transparentes Verfahren für die Suche nach und die Auswahl von Endlagerstandorten vorzulegen.³³¹ Ab diesem Zeitpunkt verfolgte die Politik in Bezug auf abgebrannte Brennelemente die Option einer direkten tiefengeologischen Endlagerung ohne Wiederaufarbeitung. Als eine Konsequenz wurden abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Zentralen Zwischenlagern, hauptsächlich in Gorleben, aber auch in Ahaus, gelagert. Mittlerweile betreiben die meisten der Atomkraftwerke Trockenlager für deren abgebrannte Brennelemente vor Ort.

Der Unfall in Fukushima im März 2011 hatte eine katalytische Wirkung auf die deutsche Atompolitik. Die Regierung hat mit Unterstützung der Parteien über das gesamte politische Spektrum hinweg entschieden, alle Atomkraftwerke bis 2022 abzuschalten.³³² Langandauernde Zweifel über die Standortauswahl und die Qualität der Geologie in Gorleben wurden durch eine Gruppe von Länderregierungen anerkannt. Es war ein beachtlicher politischer Durchbruch als die Länder ihre Unterstützung für einen Neustart eines bundesweiten Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle angekündigten. Es wurde eine Arbeitsgruppe gebildet, um einen Kompromiss zwischen den politischen Parteien und den Interessen des Bundes und der Bundesländer in Bezug auf die zukünftige Politik für ein tiefengeologisches Endlager zu finden.³³³ Zwei Jahre später hat das Parlament das Standortauswahlgesetz (StandAG) beschlossen. Nach vierzig Jahren der Exploration, des Baus eines 800 m tiefen Bergwerks und einer oberirdischen Infrastruktur und nach heftigen politischen Konfrontationen und Debatten wurden die Untersuchungsarbeiten im Salzstock Gorleben ausgesetzt. Es finden keine untertägigen Arbeiten statt. Aber Gorleben ist Teil des neuen Standortauswahlverfahrens für Endlagerung – mit 113 Behältern mit HLW (5 Behälter enthalten SNF und 108 Behälter enthalten HLW aus der Wiederverarbeitung) und ungefähr 7.000 Tonnen oder ungefähr 6 Prozent des deutschen Inventars an LILW, welches in dem dortigen Zwischenlager gelagert ist.

Im Jahre 2014 wurde die Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission) eingerichtet, um das StandAG zu überprüfen und um Empfehlungen für das Standortauswahlverfahren zu entwickeln. Diese definieren die Sicherheitsstandards, die Bewertungskriterien und ein lernendes Verfahren, das ermöglichen soll, Entscheidungen zu revidieren und die Rückholbarkeit der endgelagerten Abfälle verfolgen soll. Außerdem soll das Standortauswahlverfahren für alle potentiellen Wirtsge-

³³⁰ Dies beinhaltet 20.400 m³ SNF, 3.400 m³ Konstruktionsteile und Hülsen von der SNF-Endlagerung, 1.440 m³ verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, 1.340 m³ von dem THTR-Reaktor und 3.400 m³ Abfallgebäude mit Konstruktionsteilen von SNF.

³³¹ AkEnd, „Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd“, Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002.

³³² Christian von Hirschhausen, „German Energy and Climate Policies: A Historical Overview“, in C. von Hirschhausen et al., „Energiewende, Made in Germany“, Dezember 2018, Springer, S. 17-44.

³³³ Peter Hocke und Beate Kallenbach-Herbert, „Always the Same Old Story? Nuclear Waste Governance in Germany“, in Achim Brunnengräber et al., „Nuclear waste governance: an international comparison“, Springer VS, Januar 2015, S. 177-201.

steine in Deutschland geöffnet sein: Tongestein, Steinsalz und kristallines Gestein. Der Abschlussbericht der Kommission empfiehlt ein Verfahren in drei Stufen, begleitet durch eine öffentliche Beteiligung.³³⁴ Die Regierung hat diese Empfehlungen in ihrer Überarbeitung des StandAG von 2017 umgesetzt und hat mit 2031 ein ambitioniertes Datum für die Festlegung eines Standorts festgesetzt.

Parallel hierzu hat die deutsche Bundesregierung die Verantwortlichkeit ihrer diversen Behörden neu geordnet, mit dem Ziel einer Erhöhung der Glaubwürdigkeit und um Überschneidungen zu vermeiden. Im Jahre 2016 hat ein neues Gesetz die vorher durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) übernommenen Aufgaben auf das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)³³⁵ und auf die neue Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) übertragen.³³⁶ Alle Aufgaben der Regulierung, Genehmigung und Aufsicht des Bundes sind in der BfE gebündelt; die operativen Aufgaben der Standortauswahl und des Baus und des Betriebs der tiefeingeologischen Endlager wurden auf die BGE übertragen; diese ist außerdem verantwortlich für den Bau von Schacht Konrad (die Eröffnung dieses Lagers ist jetzt für 2027 geplant, mehr als ein halbes Jahrhundert nach der Auswahl des Standorts).

Der Besitz der Zwischenlager für HLW wurde auf die im Bundesbesitz befindliche Gesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ) übertragen. In den kommenden Jahren werden auch die LILW-Lager an den Reaktorstandorten auf das staatliche Unternehmen übertragen.

Zur Überwachung des Standortauswahlverfahrens und der Umsetzung der öffentlichen Beteiligung wurde ein pluralistisch zusammengesetztes Nationales Begleitgremium (NBG) eingerichtet. Dieses begann mit seiner Arbeit im Dezember 2016.³³⁷ Die institutionalisierte Beteiligung der Zivilgesellschaft ist ein neuer Ansatz für Deutschland. Bis jetzt ist die öffentliche Aufmerksamkeit für das neue Standortauswahlverfahren und dessen Beteiligungsverfahren gering. Im Herbst 2020 wird die BGE einen Zwischenbericht über die Auswahl von geeigneten Teilgebieten veröffentlichen und in einem vom BfE organisierten Verfahren zur Diskussion stellen.

KOSTEN UND FINANZIERUNG

Gemäß Atomgesetz (AtG) müssen die Betreiber von Atomkraftwerken für die Stilllegung und für das Management der radioaktiven Abfälle, einschließlich der Kosten für die Endlagerung, aufkommen. Aus historischen Gründen existieren zwei verschiedene Finanzierungssysteme: Eines für die früheren ostdeutschen Reaktoren, die sich jetzt im Besitz der öffentlichen Hand befinden und durch diese finanziert werden. Zum Beispiel wird die Finanzierung der Stilllegung der früheren DDR-Atomkraftwerke Greifswald und Rheinsberg vollständig durch das Bundesfinanzministerium getragen. In diesem Fall beträgt die letzte Kostenschätzung (in 2016) für beide Standorte insgesamt ungefähr € 6,5 Milliarden. Das andere Finanzierungssystem findet Anwendung auf die Anlagen in Privatbesitz. Außerdem existieren einige Reaktor-Prototypen in gemischten Eigentumsverhältnissen. In diesen Fällen ist eine anteilige Aufteilung der Kosten zwischen öffentlicher Hand und privaten Versorgungsunternehmen durch Sondervereinbarungen geklärt.³³⁸

³³⁴ Kommission ‚Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe‘, ‚Abschlussbericht der Kommission zur Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe‘, K-Drs. 268, 28. Juni 2016.

³³⁵ Am 1. Januar 2020 wurde das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) in das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BaSE) umbenannt.

³³⁶ Deutsche Bundesregierung, ‚Gesetz zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung vom 26 Juli 2016‘, (BGBl. I, S. 1843 768/16), Juli 2016.

³³⁷ Weitere Informationen unter: http://www.nationales-begleitgremium.de/DE/Home/home_node.html.

³³⁸ Europäische Kommission, ‚EU decommissioning funding data. Commission staff working document accompanying the communication—SWD (2013) 59 final‘, 8. März 2013, <http://aei.pitt.edu/42990/>, Stand 28. Juni 2019.

Im Jahre 2015 hat eine Wirtschaftsprüfungsgesellschaft im Namen der deutschen Regierung die Kosten für die Stilllegung und das Management der radioaktiven Abfälle für die 23 kommerziellen Atomkraftwerke auf diskontierte € 47,5 Milliarden geschätzt. Dies beinhaltet:

- € 19,7 Milliarden für Stilllegung und Abriss,
- € 9,9 Milliarden für Behälter, Transport und Betriebsabfälle,
- € 5,8 Milliarden für Zwischenlagerung,
- € 3,7 Milliarden für ein Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und € 8,3 Milliarden für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle.³³⁹

Die Energieversorger, die Atomreaktoren betreiben, haben € 38,2 Milliarden an Rückstellungen gebildet. Diese Finanzmittel wurden vom Verbraucher über die Strompreise eingenommen.³⁴⁰ Die geschätzten Kosten für diese Prozesse übersteigen eindeutig die Rückstellungen. Wenn das Verursacherprinzip rigoros angewendet worden wäre (dies hätte gemäß Atomgesetz der Fall sein sollen), müssten die Betreiber Konkurs anmelden.³⁴¹ Es häuften sich die Bedenken, dass sich die Betreiber im Falle eines Konkurses aus der Verantwortung ziehen und die Kosten der Öffentlichkeit überlassen würden und dass hierdurch die Sicherheit und Absicherung während der Stilllegung, der Zwischenlagerung und des Managements der Abfälle vernachlässigt werden könnte.³⁴² Als Antwort hierauf hat die Regierung die Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs (KFK) eingerichtet, um das Finanzierungssystem zu überprüfen.

Die Kommission hat empfohlen, das Finanzierungssystem fundamental zu ändern, indem man die finanziellen und organisatorischen Pflichten für das Management radioaktiver Abfälle von den Betreibern auf die Bundesregierung überträgt.³⁴³ Die Empfehlungen wurden in das neue Gesetz integriert.³⁴⁴ Die Versorgungsunternehmen sind noch immer verantwortlich für die Stilllegung und Konditionierung, aber sind von allen nachfolgenden Aufgaben in Bezug auf radioaktive Abfälle entbunden. Dementsprechend mussten die Versorgungsunternehmen den Betrag ihrer früheren Rückstellungen für das Management radioaktiver Abfälle in Höhe von € 24,1 Milliarden, einschließlich eines Risikoaufschlags, in einen externen, getrennten öffentlichen Fonds einzahlen. Der „Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung“ wurde Mitte 2017 eingerichtet, um sicherzustellen, dass die Gelder „sicher und profitabel“ investiert werden. Trotzdem werden die Verantwortung und die zukünftigen Risiken durch die öffentliche

³³⁹ Warth & Klein Grant Thornton AG, „Gutachtliche Stellungnahme zur Bewertung der Rückstellungen im Kernenergiebereich“, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 9. Oktober 2015, <http://bmwi.pro.contentstream.de/18004initag/ondemand/3706initag/bmwi/pdf/stresstestkernenergie.pdf>, Stand 5. Juni 2019.

³⁴⁰ Wolfgang Irrek und Michael Vorfeld, „Liquidity and valuation of assets in unrestricted funds from provisions set up for nuclear decommissioning, dismantling and disposal“, 7. September 2015.

³⁴¹ Friedrich Kunz, Felix Reitz, Christian von Hirschhausen und Ben Wealer, „Nuclear Power: Effects of Plant Closures on Electricity Markets and Remaining Challenges—Low Carbon Electricity Sector Reform in the European Context“, in C. von Hirschhausen et al., „Energiewende ‚Made in Germany‘“, Springer, Dezember 2018, S. 117-140.

³⁴² Christian von Hirschhausen und Felix Reitz, „Nuclear power: phase-out model yet to address final disposal issue“, DIW Berlin, *DIW Economic Bulletin*, Vol. 4(8), 2014, S. 27-35.

³⁴³ KFK, „Verantwortung und Sicherheit—Ein neuer Entsorgungskonsens“, Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs, Abschlussbericht, 27. Mai 2016.

³⁴⁴ Deutscher Bundestag, „Entwurf eines Gesetzes zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung“, Drucksache 18/10469“, 29. November 2016.

Hand getragen; dies widerspricht dem Verursacherprinzip.³⁴⁵ In seinem ersten Geschäftsjahr hat der Fonds nur einen Bruchteil der Vermögenswerte investiert und der Großteil wird noch immer bei der Bundesbank zu einem Zinssatz von 0,4 Prozent geparkt. Dies hat zu einem Zinsaufwand in Höhe von ungefähr € 39 Millionen während der ersten sechs Monate des Bestehens des Fonds geführt.³⁴⁶

ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahren hat sich Deutschland in einer Reihe von politischen Aktivitäten in Bezug auf die Handhabung von nuklearen Abfällen engagiert, teilweise wurde dies durch den Unfall von Fukushima im Jahre 2011 verstärkt, der katalytische Auswirkungen auf die deutsche Atompolitik hatte. Nach der Vereinbarung, alle Atomkraftwerke schrittweise bis 2022 abzuschalten, verlagerte sich die politische Aufmerksamkeit auf die Stilllegung und die Zwischen- und Endlagerung. Vierzig Jahre nach der ersten Standortauswahl, bei der der Salzstock in Gorleben überraschenderweise ausgewählt worden war, wurde ein neues Standortauswahlverfahren gesetzlich geregelt, die Verantwortlichkeiten von Behörden wurde neu geregelt, neue Bundesgesellschaften und Aufsichtsbehörden wurden gebildet und ein externer, abgetrennter Fonds für das Management radioaktiver Abfälle wurde eingerichtet. Die institutionalisierte Beteiligung der Zivilgesellschaft ist ein neuer Ansatz für Deutschland. Ob hierdurch ein tatsächliches Spielfeld auf Augenhöhe zwischen allen Institutionen eingerichtet wurde, muss sich noch zeigen. Bis jetzt ist die öffentliche Aufmerksamkeit für das neue Standortauswahlverfahren und dessen Partizipationsprozess schwach.

Deutschland hat ein Vermächtnis von großen Mengen an Abfällen, die momentan in Zwischenlagern – sowohl in Zentrallagern als auch in Lagern an den Reaktorstandorten – gelagert sind. Deutschland klassifiziert seine radioaktiven Abfälle in zwei Kategorien: Abfälle mit unbedeutender Wärmeentwicklung, und wärmeentwickelnde Abfälle.

Der zukünftige Entsorgungspfad für hochradioaktive Abfälle ist noch immer höchst unsicher, weil Deutschland erst jetzt in das Standortauswahlverfahren eintritt. Das tiefengeologische Endlager Konrad für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ist noch im Bau, und momentan ist geplant, das Lager im Jahre 2027 zu eröffnen. Bis zu dem Zeitpunkt werden sich alle schwach- und mittelradioaktiven Abfälle in Zwischenlagern befinden. Die Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen wird mindestens bis 2050 dauern. Die Debatte über die Notwendigkeit zur Überprüfung der Sicherheit und der Kapazitäten für die Zwischenlagerung heizt sich auf, weil die sorgfältige Auswahl eines Standorts für die tiefengeologische Endlagerung nicht durch den Mangel an Kapazität oder Sicherheitsbedenken für die Zwischenlagerung angetrieben werden sollte.

Deutschland hat einige Erfahrungen bei der Stilllegung von Atomreaktoren, aber bei allen Reaktoren, die sich momentan in der Nachbetriebsphase befinden, sehen sich die Betreiber diversen Schwierigkeiten ausgesetzt, um den Prozess zeitnah und ohne eskalierende Kosten durchzuführen. Alle geschätzten zukünftigen Kosten – insbesondere die zukünftigen Kosten in Bezug auf das Management radioaktiver Abfälle – sind aufgrund der Kostensteigerungen und der Zinssätze unsicher. Es ist fraglich, ob die in dem neugeregelten Fonds zurückgestellten Finanzmittel diese Kosten decken werden.

³⁴⁵ Elisabeth Jänsch, Achim Brunnengräber, Christian von Hirschhausen und Christian Möckel, „Wer soll die Zeche zahlen? Diskussion alternativer Organisationsmodelle zur Finanzierung von Rückbau und Endlagerung“, *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, Vol. 26(2), Dezember 2017, S. 118-120.

³⁴⁶ Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung, „Geschäftsbericht zum 31.12.2017“, Juni 2018.

7.4 UNGARN

ÜBERBLICK

Die Geschichte der Atomkraft in Ungarn geht zurück auf die 1960er Jahre. Die ungarische Regierung hat 1966 entschieden, ein Atomkraftwerk mit insgesamt vier Reaktorblöcken zu bauen. Die Bauarbeiten in Paks begannen im Jahre 1974. Die Stromproduktion begann im Jahre 1982. Alle vier Blöcke sind Druckwasserreaktoren (VVER-440/213). Paks ist momentan das einzige Atomkraftwerk mit solchen Reaktoren weltweit, die mit einer verlängerten Brennstoffkette betrieben werden: die Brennelemente werden statt alle 12 Monate alle 15 Monate ausgetauscht.³⁴⁷ In Übereinstimmung mit dem Programm zur Verlängerung der Betriebszeiten von 2012 wird erwartet, dass die vier Blöcke bis Mitte der 2030er Jahre in Betrieb sein werden.

Im Jahre 2018 wurden die vier Reaktoren in Paks mit einer hohen Verfügbarkeit (89 Prozent) betrieben; diese Reaktoren produzierten ungefähr 15 TWh Strom und waren hiermit für ungefähr die Hälfte der Stromproduktion des Landes verantwortlich.³⁴⁸

Im Jahre 2014 hat die ungarische Regierung einen zwischenstaatlichen Vertrag mit der Russischen Föderation unterzeichnet, um zwei weitere Einheiten mit einer Leistung von jeweils 1.200 MW zu bauen. Die Einheiten werden in Paks gebaut, 100 km südlich von Budapest. Allerdings wurde mit den Bauarbeiten von Paks II bis jetzt noch nicht begonnen, was die geplante Inbetriebnahme in die späten 2020er Jahre verschieben könnte.

Die einzige Uranmine in Ungarn wurde 1997 aus Gründen der Unwirtschaftlichkeit geschlossen.³⁴⁹ Aufgrund der geplanten Erweiterung von Paks plant die Hungarian Uranium Resources Ltd. die Wiedereröffnung der Mine, obwohl die Behörden die Umweltgenehmigung der Investition im ersten Anlauf verweigert haben. Ungarn verfügt nicht über Wiederaufarbeitungskapazitäten für abgebrannte Brennelemente.

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Das ungarische Klassifizierungssystem für Abfälle ist in dem nationalen ungarischen Programm für das Management von abgebrannten Brennelementen und anderen radioaktiven Abfällen festgelegt. Dessen vorrangiges Prinzip besteht darin, dass die in dem kontrollierten Bereich anfallenden Abfälle so lange als radioaktiv behandelt werden müssen, bis das Gegenteil bewiesen ist.³⁵⁰ Das Programm basiert auf den Empfehlungen der IAEO und der EU-Ratsrichtlinie 2011/70/EURATOM. Gemäß dem 2. Atomenergiegesetz von 1996 ist die ungarische Regierung dazu verpflichtet, ein tiefengeologisches Endlager für radioaktive Abfälle zu organisieren.³⁵¹

³⁴⁷ Weitere Informationen über den Reaktorkern (VVER-440/213), siehe Webseite des Atomkraftwerk Paks.

³⁴⁸ MVM, „Továbbra is Paks termeli a legtöbb áramot“, Webseite Atomkraftwerk Paks, 19. Februar 2019, <http://www.atomeromu.hu/hu/Rolunk/Hirek/Lapok/HirReszletek.aspx?hirId=650>, Stand 26. Februar 2019.

³⁴⁹ MVM, „Mining of uranium ore“, Atomkraftwerk Paks, o.D., http://www.atomeromu.hu/en/Documents/7_Life_of_uranium_1.pdf, Stand 26. Februar 2019.

³⁵⁰ Ungarische Regierung, „Hungary’s national program for spent fuel and radioactive waste management“, August 2016, http://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/2017-05-09-Program_national_HU.pdf, Stand 26. Februar 2019.

³⁵¹ Ungarische Regierung, „Act CXVI of 1996 on Atomic Energy“, 1996, https://www.oecd-nea.org/law/legislation/hungary1996_aea.pdf, Stand 18. August 2020.

Ungarn klassifiziert radioaktive Abfälle in vier Kategorien: in Bezug auf den Status, auf die Wärmeentwicklung, auf die Radioaktivitätskonzentration und auf die Halbwertszeit.

- Bei den nach dem Status klassifizierten radioaktiven Abfällen kann es sich um Feststoffe, um Stoffe biologischen Ursprungs, um flüssige und nicht-entflammbare, flüssige und entflammbare und um luftgetragene Abfälle handeln.
- Auf der Basis von Wärmeentwicklung wird unterschieden zwischen schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (LILW) und hochradioaktiven Abfällen (HLW).
- Die Kategorien schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle werden auch verwendet, wenn in Bezug auf Radioaktivität unterschieden wird.
- Die durch die Halbwertszeit der Radionuklide klassifizierten Abfälle können kurz-, mittel- und langlebige (mehr als 30 Jahre) Abfälle sein.³⁵²

Die Verordnung 23/1997 definiert einen Radioaktivitätslevel bei schwachradioaktiven Abfällen, unterhalb dessen diese Abfälle von den Aufsichtsregularien (oder Freigaberegularien) ausgenommen werden. Aber die ungarischen Vorschriften verwenden ein weiteres System, das die radioaktiven Abfälle auf der Grundlage der Dosisrate der Gammastrahlung, gemessen in einem Abstand von 10 cm von der Oberfläche der Abfallgebinde, klassifiziert. In diesem Fall beträgt die Strahlung der schwachradioaktiven Abfälle weniger als 0,3 Millisievert pro Stunde (mSv/h) und bei hochradioaktiven Abfällen mehr als 10 mSv/h.

ABFALLMENGEN

Die ungarische Regierung berichtet regelmäßig über die Mengen an abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen. Die Berichte werden für das Gemeinsame Übereinkommen der IAEO erstellt. Der letzte Bericht wurde für das Jahr 2018 fertiggestellt. Bis 1998 hat Ungarn abgebrannte Brennelemente zur Wiederaufarbeitung nach Russland geschickt (2.331 Brennelemente oder 273 Tonnen Schwermetallinhalt). Nach diesem Zeitpunkt wurden abgebrannte Brennelemente vorübergehend in dem Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente in der Nähe des Atomkraftwerks Paks gelagert.

³⁵² Ungarische Regierung, „National Report—Sixth Report prepared within the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“, 2017.

TABELLE 15: Radioaktive Abfälle in Ungarn – Stand 31. Dezember 2016

Abfallart	Art der Lagerung	Lagerstandort	Menge
SNF (HLW)	Zwischenlagerung (nass)	Reaktorlagerbecken in Paks	1.800 FA
	Zwischenlagerung (trocken)	SFISF in Paks	8.707 FA
HLW	Zwischenlagerung	Paks	102 m ³
LILW FLÜSSIG	Zwischenlagerung	Reaktorlagertanks in Paks	8.131 m ³
LILW FEST	Zwischenlagerung	Reaktorlager in Paks	1.835 m ³
	Zwischenlagerung	Oberflächennahes Endlager RWTDF	225 m ³
	Endgelagerte Abfälle	Oberflächennahes Endlager RWTDF	4.900 m ³
	Zwischenlagerung	Oberflächennahes Endlager RWTDF	430 m ³
	Endgelagerte Abfälle	Oberflächennahes Endlager RWTDF	876 m ³
VLLW	n.z.		
URANHALTIGE ABFÄLLE	Deponien + Schlam- mabsetzanlagen	in Rekultivierung	10 Millionen m ³ Abfallgestein und 3,4 Millionen m ³ Halden Auslaugungsmaterial

Quelle: Ungarische Regierung, Sechster Nationaler Bericht, erstellt innerhalb des Rahmens des Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (2017).

Anmerkungen: FA = Fuel Assembly/Brennelement;
SFISF = Spent Fuel Interim Storage Facility/ Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente;
RWTDF = Radioactive Waste Treatment and Disposal Facility/Anlage zur Behandlung und Entsorgung radioaktiver Abfälle (in Püspökszilágy)

Gemäß dem Nationalen Bericht werden die radioaktiven Abfälle aus der Stilllegung in einem anderen Lager gelagert (in dem Gebiet Boda im Süden des Landes). Die geschätzte Menge von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen aus der Stilllegung von Paks beläuft sich auf 9.147 Behälter mit jeweils 1,8 m³ und 2.846 Behälter mit jeweils 3,6 m³. Das geschätzte Bruttovolumen an hochradioaktiven Abfällen aus der Stilllegung und aus dem Betrieb, die in dem geplanten tiefengeologischen Endlager gelagert werden sollen, beträgt 300 m³.

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

Der Ansatz für das Management von radioaktiven Abfällen Ungarns wird durch das Atomenergiegesetz von 1996 definiert.³⁵³ Die Öffentlich-Rechtliche Gesellschaft für das Management von Radioaktiven Abfällen ist verantwortlich für alle vier Endlagerstätten für radioaktive Abfälle in Ungarn. Für Abfälle aus dem Atomenergiesektor bestehen zwei Anlagen:

- Das Nationale Endlager für Radioaktive Abfälle oder NRWR (National Radioactive Waste Repository) in Bataapáti ist das Lager, in dem die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle aus dem Atomkraftwerk Paks gelagert sind. Hier eingehende Feststoffabfälle werden in verdichtete Formen, üblicherweise 200 l-Fässer, geladen. Flüssige Abfälle werden in Tanks gesammelt. Die Kapazität dieses Lagers beträgt 3.000 Fässer.³⁵⁴

³⁵³ Ungarische Regierung, „Gesetz CXVI von 1996 über Atomenergie“, 1996.

³⁵⁴ NRWR, „16 drums loaded into 4 transport frames can be put on the vehicle“, National Radioactive Waste Repository, Nationales Ungarisches Endlager für Radioaktive Abfälle, o.D.

- Das zweite Lager ist ein Lager für abgebrannte Brennelemente oder SFISF (Spent Fuel Interim Storage Facility) in der Nähe des Atomkraftwerks Paks. Diese Anlage ist 1998 in Betrieb gegangen. Vor diesem Zeitpunkt wurden die abgebrannten Brennelemente nach Russland geschickt. Seit Ungarn die Handhabung von abgebrannten Brennelementen begonnen hat, wurde die gesamte Lagerkapazität erweitert und zum jetzigen Zeitpunkt beträgt die Kapazität 9.308 abgebrannte Brennelemente.³⁵⁵

Darüber hinaus wurden einige schwachradioaktive Abfälle aus Paks vorübergehend in der Anlage zur Behandlung und Lagerung von Radioaktiven Abfällen oder RWDTF (Radioactive Waste Treatment and Disposal Facility) gelagert, die hauptsächlich für Abfälle verwendet wird, die nicht aus der Stromerzeugung stammen.³⁵⁶

Das Atomenergiegesetz reguliert das Management von radioaktiven Abfällen und autorisiert die Regierung, Verordnungen zu erlassen, die die Anforderungen in diesem Bereich spezifizieren. Das Gesetz dient als Rahmen für den Bau und die Unterhaltung von Anlagen zur Endlagerung von Abfällen und für die Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen. Nach dem Beitritt Ungarns in die Europäische Union (EU) wurde das Gesetz angepasst, um die EU- und EURATOM-Vorschriften zu erfüllen. Das Gesetz spezifiziert, dass das Management von radioaktiven Abfällen zukünftigen Generationen keine Lasten aufbürden sollte. Es wurde die Öffentliche Agentur für das Management von Radioaktiven Abfällen geschaffen, die von 1998 bis 2008 bestand. Anschließend wurde diese Institution in die Aktiengesellschaft für das Management von Radioaktiven Abfällen oder PURAM (Public Limited Company for Radioactive Waste Management) transformiert. Seit 2008 ist PURAM verantwortlich für den Betrieb von Zwischenlagern und Endlagern für radioaktive Abfälle und für die Aktualisierung der Pläne der Aktivitäten, die durch den Zentralen Nuklear-Finanzierungsfonds finanziert werden.

Im Jahre 1971 hat die ungarische Regierung entschieden, die Anlage für die Behandlung und Endlagerung radioaktiver Abfälle für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus den Nuklearaktivitäten, die nicht im Zusammenhang mit der Stromerzeugung stehen, zu bauen. Im Jahre 1995 wurde ein nationales Programm angekündigt, um sich dem Problem von hochradioaktiven und langlebigen radioaktiven Abfällen zu widmen. Als Ergebnis hat die PURAM ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente neben dem Atomreaktor Paks eingerichtet. Die Anlage kann abgebrannte Brennelemente für einen Zeitraum von mindestens 50 Jahren lagern (in deren geplanten 36 Modulen). Im Jahre 2012 war die Anlage zur Hälfte fertiggestellt.

Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle aus dem Atomreaktor Paks gehen in das NRWR Endlager in Bataapáti.³⁵⁷ Die Betriebsgenehmigung erlaubt die Pufferlagerung von 3.000 Fässern (mit einem Fassungsvermögen von jeweils 200 l), die schwach- und mittelradioaktive Feststoffabfälle enthalten. Gemäß PURAM wird die Kapazität des Endlagers in Bataapáti die Nachfrage des Atomreaktors Paks erfüllen und die unterirdische Lagerkapazität wird erweitert, damit diese für die gesamte Betriebszeit des Atomreaktors Paks I ausreicht.³⁵⁸

³⁵⁵ NRWR, „History of spent fuel storage“, National Radioactive Waste Repository, Nationales Ungarisches Endlager für Radioaktive Abfälle, o.D.

³⁵⁶ Babett Oroszi, „Tritium Leak and Waste Packaged in Plastic Bags: Questions about the Nuclear Cemetery“, *Atlatzo*, 27. Februar 2019, <https://english.atlatzo.hu/2019/02/27/tritium-leak-and-waste-packaged-in-plastic-bags-questions-about-the-nuclear-cemetery/>, Stand 26. Februar 2019.

³⁵⁷ Das Endlager ging 2018 in Betrieb.

³⁵⁸ Ungarische Regierung, „National Report—Second Report prepared in the framework of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“, National Bericht, 2005, [http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/5E4C87A0B24A7094C1257C5C00364137/\\$FILE/nationrep2.pdf](http://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/5E4C87A0B24A7094C1257C5C00364137/$FILE/nationrep2.pdf), Stand 26. Februar 2019.

Im Jahre 2015 hat die Regierung damit begonnen, Forschungsarbeiten für eine tiefegeologische Endlagerung in dem Gebiet Boda durchzuführen. Der momentane Stand der Wissenschaft geht davon aus, dass Ton das am besten geeignete geologische Medium in Ungarn ist. Der Forschungsprozess befindet sich momentan in der Phase der Auswahl des besten Standorts. Gemäß den neuesten Plänen wird das Endlager zwischen 2030 und 2064 gebaut, um einen Betriebsbeginn nach dem Beginn der Stilllegung von Paks zu ermöglichen.

Im Jahre 1996 haben die Bürgermeister der potentiell betroffenen Gemeinden einen Verband gegründet, um ihre Interessen zu organisieren. Die Aufgaben des Verbands umfassen die Bereitstellung von Informationen zu dem Forschungsprozess, die Kontrolle des Überwachungsnetzwerks und die Vielzahlentwicklung der Mitgliedsgemeinden. Der Verband organisiert, zusammen mit PURAM, eine jährliche Zusammenkunft, bei der Sachverständige Informationen präsentieren und eine internationale Perspektive in Bezug auf die tiefegeologische Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen aufzeigen. Seit 2003 hat die PURAM alle zwei Jahre eine Umfrage in der betroffenen Region über die Wahrnehmung der Forschungsarbeiten zu der Endlagerung von radioaktiven Abfällen und deren Akzeptanzlevel in der Bevölkerung vor Ort durchgeführt.³⁵⁹ Nur der Gemeindeverband und PURAM (die offiziellen Informationsquellen) stehen den Anwohnern zur Verfügung, um Informationen zu erhalten.

KOSTEN UND FINANZIERUNG

Das Atomenergiegesetz reguliert die Finanzierung der Stilllegung der Paks-Anlage. Es wurde ein Zentraler Nuklear-Finanzierungsfonds eingerichtet, der seit 1998 besteht. Es ist ein Fonds des Finanzministeriums und Bestandteil des Budgets der Regierung. Zur Sicherstellung der finanziellen Stabilität erhält der Fonds die Unterstützung des zentralen Staatsbudgets. Bis zum Jahre 2014 hat die Nationale Atomenergiebehörde den Fonds gemanagt; anschließend wurde das Management durch das Ministerium für Nationale Entwicklung durchgeführt. Gemäß dem Haushaltsvorschlag des Zentralen Nuklear-Finanzierungsfonds werden die geplanten Budgetausgaben für das fortlaufende Management radioaktiver Abfälle und sonstige Waste-Management-Projekte (z.B. für die Forschung zu der tiefegeologischen Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und für die Stilllegung von Atomanlagen) HUF 14,8 Milliarden (€₂₀₁₈ 46,3 Millionen) betragen, während die in den Fonds eingezahlten Finanzmittel im Jahre 2019 HUF 27 Milliarden (€₂₀₁₈ 83,5 Millionen) betragen werden.³⁶⁰ Der Gesamtumfang des Fonds betrug HUF 255 Milliarden (€₂₀₁₆ 821,3 Millionen) im Jahre 2016.³⁶¹

Das Gesetz schreibt das Verursacherprinzip vor; das bedeutet, dass die Institution, die die radioaktiven Abfälle produziert, für deren Management zu zahlen hat. Der Fonds wird also von allen Anlagen finanziert, in denen radioaktive Abfälle anfallen, wobei der Großteil der Abfälle aus Paks stammt (ungefähr 90 Prozent des Jahreseinkommens des Fonds stammt von dem Atomkraftwerk). Ein signifikanter Teil des Fonds wird für den Unterhalt der Endlager für radioaktive Abfälle und das Budget von PURAM ausgegeben. Es ist geplant, dass langfristig annähernd die Hälfte des Budgets des Fonds für die Handhabung der abgebrannten Brennelemente und ein Viertel für die Stilllegung von Paks ausgegeben wird. Der Gesamtaufwand für die durch den Fonds zu finanzierenden Aktivitäten für die vier bis zum Jahre 2084 in Betrieb befindlichen Reaktoren wird auf € 5,4 Milliarden geschätzt. Gemäß den derzeitigen Plänen werden die Zahlungen durch das Atomkraftwerk Paks weniger als die Hälfte dieser Kosten decken. Es bleibt offen, wie der Rest finanziert werden soll. Während die angesammelten Rückstellungen auch

³⁵⁹ PURAM, „Lakossági kapcsolatok és kommunikáció“, Aktiengesellschaft für Management Radioaktiver Abfälle, o.D.

³⁶⁰ Ungarisches Parlament, „A Központi Nukleáris Pénzügyi Alap 2019. évi költségvetési javaslat“, 21. Juni 2018, <https://www.parlament.hu/irom41/00503/adatok/fejezetek/66.pdf>, Stand 8. März 2019.

³⁶¹ PURAM, „A feladatok finanszírozása“, Aktiengesellschaft für Management Radioaktiver Abfälle, o.D.

in dem Jahresbudget des Zentralen Nuklear-Finanzierungsfonds erscheinen, stehen diese eventuell tatsächlich nicht zur Verfügung. Gemäß dem ungarischen Rechnungshof existieren keine tatsächlichen Guthaben hinter dem Betrag auf dem Bankkonto; dies wird in der Zukunft Probleme bereiten, sobald die Kosten entstehen. Die für die neu geplanten Einheiten in Paks entstehenden zusätzlichen Kosten sind bis jetzt noch nicht durch den Fonds gedeckt.³⁶²

ZUSAMMENFASSUNG

Während die nukleare Geschichte Ungarns bis in die 1960er Jahre zurückgeht, steckt das Management radioaktiver Abfälle noch in den Kinderschuhen. Die Regulierung des Managements von radioaktiven Abfällen hat in den letzten Jahrzehnten diverse Änderungen erfahren, um sich an die EU-Gesetze anzupassen. Darüber hinaus hat Ungarn die meisten der rechtlichen und aufsichtsrechtlichen Empfehlungen der Internationalen Atomenergie-Organisation umgesetzt. Ungarn hat langfristige Pläne für das Management von radioaktiven Abfällen, aber wird eventuell nicht in der Lage sein, diese bis zu dem Zeitpunkt zu realisieren, zu dem Paks II gebaut ist. Der Zentrale Nuklear-Finanzierungsfonds wurde eingerichtet, um die Kosten im Zusammenhang mit abgebrannten Brennelementen und der Stilllegung der vier in Betrieb befindlichen Reaktoren in Paks zu decken, aber die geplanten € 5,4 Milliarden werden langfristig nicht gedeckt sein. Darüber hinaus ist es überhaupt nicht sicher – obwohl Forschungsarbeiten in Bezug auf die tiefengeologische Endlagerung radioaktiver Abfälle fortschreiten – ob die bestmögliche Sicherheit gewährleistet werden kann. Momentan sind in Ungarn zwei hauptsächliche Anlagen für radioaktive Abfälle in Betrieb. Allerdings ist ein tiefengeologisches Endlager dringend notwendig. Die Abfallmengen werden sich erheblich erhöhen, und zwar nicht nur aufgrund der Stilllegung der vier Paks-Reaktoren, sondern auch aufgrund der beiden geplanten neuen Reaktoren Paks II.

³⁶² Zsuzsanna Koritár, „Postponed Policy“, März 2018, in Achim Brunnengräber et al. „Challenges of Nuclear Waste Governance“, Springer VS, März 2018, S. 123-137.

7.5 SCHWEDEN

ÜBERBLICK

Die atomaren Bestrebungen Schwedens begannen mit einem kombinierten militärischen und zivilen Nuklearprogramm auf der Grundlage von Schwerwasserreaktoren in den späten 1940er Jahren. Zwei Forschungsreaktoren gingen 1954 und 1960 in Betrieb. Ein dritter unterirdischer Reaktor ging 1964 in Betrieb; dieser Reaktor lieferte Fernwärme an die Kommune und Strom in das Leitungsnetz. Aber der Hauptzweck bestand darin, Plutonium für das schwedische Atomwaffenprogramm zu liefern. Alle drei dieser frühen Reaktoren sind entweder bereits stillgelegt oder befinden sich im Prozess der Stilllegung.

Nach langandauernden öffentlichen Diskussionen Mitte der 1960er Jahre hat die Regierung beschlossen, dass Militärprogramm, zusammen mit dem Programm der Schwerwasserreaktoren, aufzugeben. Stattdessen wurden neun Siedewasserreaktoren und drei Druckwasserreaktoren zwischen 1972 und 1985 an vier Standorten in Betrieb genommen.

Im Laufe der Jahre – und mit einem höheren Tempo in den letzten Jahren – hat Schweden seine Nuklearkapazität reduziert. Die zwei Reaktoren der Anlage Barsebäck in der Nähe der dänischen Grenze wurden 1999 und 2005 abgeschaltet. Zwei von drei Reaktoren der Anlage Oskarshamn wurden 2015 und 2017 abgeschaltet. Zwei der vier Reaktoren der Anlage Ringhals werden 2019 und 2020 abgeschaltet,³⁶³ sodass noch zwei Reaktoren in Betrieb bleiben. Drei Reaktoren sind in Forsmark in Betrieb. Im Jahre 2018 waren die acht in Schweden in Betrieb befindlichen Reaktoren für ungefähr ein Drittel der Stromversorgung verantwortlich.³⁶⁴

Seit 2016 besteht eine politische Vereinbarung, dass die schwedische Stromerzeugung bis zum Jahre 2040 zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energiequellen stammen soll. Gleichzeitig gibt es keinen Ausstiegsplan für die sechs Reaktoren, die nach 2020 in Betrieb sein werden. Die Vereinbarung besagt nur, dass es keine Subventionen für Atomenergie geben soll und dass die verbliebenen Reaktoren abgeschaltet werden müssen, wenn diese nicht länger profitabel sind. Es gibt momentan keine Pläne, um neue Reaktoren in Schweden zu bauen, obwohl ein gesetzliches Verbot gegen den Bau von neuen Atomreaktoren im Jahre 2010 aufgehoben wurde.

In den 1960er Jahren wurde eine unterirdische Wiederaufarbeitungsanlage für radioaktive Abfälle geplant, aber es wurde nie mit dem Bau begonnen. Allerdings wurden in den 1960er Jahren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Bezug auf Wiederaufarbeitung durchgeführt; dies hat zu Abfallströmen geführt, die heutzutage der hauptsächliche Bestandteil des Problems von Hinterlassenschaften von radioaktiven Abfällen in Schweden sind. Die hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung aus diesen Aktivitäten befinden sich nicht länger in Schweden. In den späten 1970er Jahren hat Schweden Wiederaufbehandlungsverträge mit Frankreich und Großbritannien geschlossen, aber es wurden letztendlich nur 140 Tonnen abgebrannte Brennelemente in Großbritannien wiederaufgearbeitet. Schweden hat sich ungefähr im Jahre 1980 aus wirtschaftlichen Gründen und aus Gründen der Nichtverbreitung von Kernwaffen stattdessen dazu entschieden, die abgebrannten Brennelemente direkt endzulagern. Schweden verfügt über ein Endlager für kurzlebige, schwachradioaktive und mittlerradioaktive Abfälle, und ein Endlager für abgebrannte Brennelemente befindet sich in einem Genehmigungsverfahren. Ein Endlager für langlebige, mittlerradioaktive Abfälle ist außerdem geplant.

³⁶³ Ringhals-2 wurde am 31. Dezember 2019 abgeschaltet.

³⁶⁴ WNA Website, „Atomenergie in Schweden“, World Nuclear Association, 2018, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/sweden.aspx>, Stand 22. April 2019.

Schweden hat eine Uranabbauanlage in Ranstad, die für einen kurzen Zeitraum in den 1960er Jahren in Betrieb war. Diese Anlage wurde in den 1990er Jahren stillgelegt und die Rekultivierung gilt als beendet. Schweden verfügt außerdem über eine Brennelementefabrik in Västerås, die sich momentan im Besitz von Westinghouse befindet.

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Schweden unterscheidet radioaktive Abfälle auf der Grundlage von Aktivität und Halbwertszeit. Dieses Klassifizierungssystem wurde durch SKB (Svensk Kärnbränslehantering Aktiebolag) – die Schwedische Gesellschaft für Nukleare Brennstoffe und Abfallmanagement (SKB) – entwickelt und führt die nachfolgenden fünf Kategorien auf:³⁶⁵

TABELLE 16: Kategorien von radioaktiven Abfällen in Schweden per 2018

Abfallart	Bestimmungsort	Definition	Sonstige Erwägungen
FREIGEgebenES MATERIAL	Kein Endlager erforderlich	Material mit so geringen Radioaktivitätswerten, dass diese aus der Atomaufsicht entlassen werden können	keine
SEHR SCHWACH-RADIOAKTIVE, KURZLEBIGE ABFÄLLE (VLLW-SL)	Deponie	Geringe Mengen an kurzlebigen Nukliden mit einer Halbwertszeit von weniger als 31 Jahren. Die Dosisrate pro Behälter (und nicht-abgeschirmtem Abfall) ist geringer als 0,5 mSv/h. Langlebige Nuklide mit einer Halbwertszeit von mehr als 31 Jahren können in begrenzten Mengen vorhanden sein	keine
SCHWACHRADIOAKTIVE, KURZLEBIGE ABFÄLLE (LLW-SL)	Endlager für kurzlebige Abfälle (SFR)	Geringe Mengen an kurzlebigen Nukliden mit einer Halbwertszeit von weniger als 31 Jahren. Die Dosisrate pro Behälter (und nicht-abgeschirmtem Abfall) ist geringer als 2,0 mSv/h. Langlebige Nuklide mit einer Halbwertszeit von mehr als 31 Jahren können in begrenzten Mengen vorhanden sein	keine
MITTEL-RADIOAKTIVE, KURZLEBIGE ABFÄLLE (ILW-SL)	Endlager für kurzlebige Abfälle (SFR)	Signifikante Mengen an kurzlebigen Nukliden mit einer Halbwertszeit von weniger als 31 Jahren. Die Dosisrate pro Behälter beträgt weniger als 500 mSv/h. Langlebige Nuklide mit einer Halbwertszeit von mehr als 31 Jahren können in begrenzten Mengen vorhanden sein	Erfordert Strahlenabschirmung während des Transports
SCHWACH- UND MITTEL-RADIOAKTIVE, LANGLEBIGE ABFÄLLE (LILW-LL)	Endlager für langlebige radioaktive Abfälle (SFL)	Signifikante Mengen an langlebigen Nukliden mit einer Halbwertszeit von mehr als 31 Jahren sind vorhanden, diese überschreiten die begrenzten Mengen für kurzlebige Abfälle	Erfordert spezielle Sicherheitsbehälter während des Transports
ABGEBRANNTES BRENNNELEMENTE (SNF) / HOCH-RADIOAKTIVE ABFÄLLE (HLW)	Tiefengeologisches Endlager für abgebrannte Brennelemente	Typische Zerfallswärme >2kW/M ³ und enthält signifikante Mengen an langlebigen Nukliden mit einer Halbwertszeit von mehr als 31 Jahren; diese überschreiten die begrenzten Mengen für kurzlebige Abfälle	Erfordert Kühlung und Strahlenabschirmung während der Zwischenlagerung und des Transports

Quelle: SSM/Schwedische Strahlenschutzbehörde (2018).

Die Klassifizierung unterscheidet sich leicht von der IAEO-Definition, und zwar im Hinblick darauf, dass sich Schweden im Gegensatz zu der Kategorie von schwachradioaktiven Abfällen (LLW) der IAEA auf kurzlebige Abfälle konzentriert. Die schwedischen schwachradioaktiven- und mittelradioaktiven, kurzlebigen Abfälle (LLW-SL und ILW-SL) entsprechen deshalb LLW gemäß der IAEO-Klassifizierung.

³⁶⁵ SSM, „Swedens second National Report on Implementation of Council Directive 2011/70/Euratom“, Schwedische Strahlenschutzbehörde, 3. August 2018, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/swedens-implementation-of-nuclear-waste-directive-reported-to-european-commission/>, Stand 22. April 2019.

ABFALLMENGEN

Das Umwelt- und Energieministerium und die Aufsichtsbehörde, die Schwedische Strahlenschutzbehörde – SSM (Strålsäkerhetsmyndigheten) – veröffentlichten alle drei Jahre Inventare in dem Bericht an das Gemeinsame Übereinkommen der IAEO³⁶⁶ und berichten außerdem in Übereinstimmung mit der EU-Richtlinie zu Radioaktiven Abfällen.³⁶⁷ Die letzten Bestände in den Berichten beziehen sich auf den 31. Dezember 2016 und sind in Tabelle 17 aufgeführt.

TABELLE 17: Radioaktive Abfälle in Schweden – Stand 31. Dezember 2016

Abfallart	Art der Lagerung	Lagerstandort	Menge
SNF (HLW)	Zwischenlagerung (nass)	An den Reaktorstandorten	2.387 FA oder 492 tHM*
	Zwischenlagerung (nass)	Zentrales oberflächennahes Zwischenlager (CLAB) in Lagerbecken, die 75 Meter unter der Erde am AKW Oskarshamn liegen	31.817 FA oder 6.267 tHM**
	SNF zur Wiederaufarbeitung verbracht	140 tHM nach GB vom AKW Oskarshamn ; 56 tHM nach Frankreich vom AKW Barsebäck	206 tHM***
LLW-SL UND ILW-SL	Zwischenlagerung	Am Standort Studsvik und an den Reaktorstandorten	8.500 m ³
ILW-LL	Zwischenlagerung	Am Standort Studsvik, an den Reaktorstandorten und im Zwischenlager (CLAB)	5.300 m ³
VLLW	Zwischenlagerung	An den Reaktorstandorten	2.900 m ³
LLW-SL UND ILW-SL	Entsorgte Abfälle	Oberflächennahes Endlager (SFR) 50 Meter unter dem Meeresboden außerhalb vom AKW Forsmark	38.922 m ³
VLLW	Deponie	Deponien an den Reaktorstandorten (außer Barsebäck) und in Studsvik	27.841 m ³

Quelle: SKB/Schwedische Gesellschaft zum Management von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen (2017).

Anmerkungen: FA = Fuel Assembly/Brennelement; AKW = Atomkraftwerk; SNF = Spent Nuclear Fuel/Abgebrannte Brennelemente.

*einschließlich von 0,04 tHM abgebrannten Brennelementen aus dem Forschungsreaktor R1 am Standort Studsvik.

**einschließlich von 2,7 tHM Brennelementteilen aus der Heißen Zelle der Atomforschungsanlage Studsvik und 22.5 tHM abgebrannte MOX-Brennelemente aus Deutschland.

***Außerdem wurden 4,7 tHM abgebrannte Brennelemente aus dem Forschungsreaktor R1 zur Wiederaufarbeitung nach Großbritannien und mindestens 13 tHM abgebrannte Brennelemente aus dem Forschungsreaktor R2/R2-0 zur Wiederaufarbeitung in die USA und nach Belgien versandt.

Es gibt momentan fast 7.000 Tonnen abgebrannter Brennelemente in Schweden, wovon sich der größte Teil in einem Zentralen Nasslager (CLAB) befindet. Die abgebrannten Brennelemente bleiben nur für einige Jahre in den Abklingbecken an den Reaktorstandorten. Ungefähr 8.500 m³ von kurzlebigen,

³⁶⁶ Ministry of the Environment, „Sweden’s sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management“, Schwedische Regierung, Ds 2017:51, 23. Oktober 2017, <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/departementsserien-och-promemorior/2017/10/ds-201751/>, Stand 22. April 2019.

³⁶⁷ SSM, „Sweden’s second National Report on Implementation of Council Directive 2011:70/Euratom“, Schwedische Strahlenschutzbehörde, 3. August 2018, <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/swedens-implementation-of-nuclear-waste-directive-reported-to-european-commission/>, Stand 22. April 2019.

schwach- und mittelradioaktiven Abfällen und 5.300 m³ von langlebigen, mittelradioaktiven Abfällen befinden sich momentan in Zwischenlagern. Die nuklearen Hinterlassenschaften befinden sich hauptsächlich am Standort Studsvik, aber es fallen steigende Mengen an den Reaktorstandorten an, an denen Stilllegungsarbeiten vorgenommen werden. Kurzlebige, schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus dem Reaktorbetrieb werden in einem bestehenden Endlager (SFR) gelagert, wo jetzt annähernd 40.000 m³ Abfälle gelagert worden sind. Sehr schwach radioaktive Abfälle werden auf Deponien entsorgt, und es gibt fast 30.000 m³ in vier solcher Deponien. Darüber hinaus sind noch 2.900 m³ sehr schwach radioaktiver Abfälle gelagert.

Auf der Grundlage der Szenarien der Industrie in Bezug auf die Betriebszeiten wird eine endgültige Menge an abgebrannten Brennelementen in Schweden von 11.400 Tonnen erwartet. Die geschätzten Abfallmengen nach der Stilllegung aller Atomanlagen summieren sich auf 153.000 m³ kurzlebiger, schwach- und mittelradioaktiver Abfälle und auf 16.400 m³ langlebiger, mittelradioaktiver Abfälle.³⁶⁸

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

Gemäß dem Atomgesetz von 1984 liegt es in dem Verantwortungsbereich der Atomindustrie und deren Versorgungsunternehmen, das Management radioaktiver Abfälle und die tiefengeologische Endlagerung radioaktiver Abfälle zu finanzieren und durchzuführen.³⁶⁹ Das Gesetz wird momentan überprüft. Die Industrie muss alle drei Jahre einen Forschungs- und Entwicklungsbericht an die Aufsichtsbehörde, die Schwedische Strahlenschutzbehörde (SSM), übergeben. Die Regierung muss den Bericht prüfen und genehmigen und kann dies unter den Bedingungen der Industrie tun. Dies ist der einzige Weg für die Regierung, Änderungen an den Plänen der Industrie in Bezug auf radioaktive Abfälle zu verlangen, und sie hat dies selten getan.

Die Aufsichtsbehörde, SSM, überprüft die Genehmigung der Atomanlagen, wie z.B. der tiefengeologischen Endlager, auf der Basis des Atomgesetzes. Seit den späten 1990er Jahren müssen alle Atomanlagen außerdem eine Genehmigung in Übereinstimmung mit den Schwedischen Umweltschutzbestimmungen haben. Der zweispurige Genehmigungsprozess führt zu Empfehlungen vonseiten der SSM, des Landes und des Umwelt-Gerichtshofs an die schwedische Regierung, die die endgültige Genehmigungsentcheidung trifft.

Die Atomindustrie hat ein privates Unternehmen gegründet, um die in ihrem Verantwortungsbereich liegenden Aufgaben durchzuführen. Die SKB betreibt die bestehenden und entwickelt neue Anlagen. Es wurde ein weiteres Unternehmen, die Svafo AB, gegründet, um die Verantwortung für die Hinterlassenschaften an radioaktiven Abfällen zu übernehmen; diese bestehen hauptsächlich aus radioaktiven Abfällen aus den militärischen Aktivitäten in der Vergangenheit und den zivilen Forschungsprogrammen. Seit 2009 befindet sich die Svafo AB in Besitz der Atomindustrie.

³⁶⁸ SKB, „Plan 2016—Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear Power—Basis for fees and guarantees for the period 2018–2020“, Schwedische Gesellschaft zum Management von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen, SKB TR-17-02, April 2017, S. 35–36, <http://www.skb.com/publication/2487964/>, Stand 22. April 2019.

³⁶⁹ Kärnavfallsrådet, „Report 2011:2e from the Swedish National Council for Nuclear Waste—Licensing under the Environmental Code and the Nuclear Activities Act of a final repository for spent nuclear fuel“, Swedish National Council for Nuclear Waste, Übersetzung des Bericht 2011:2e, 2013, https://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/eport_2011_2.pdf, Stand 22. April 2019.

Die abgebrannten Brennelemente aus den Atomkraftwerken werden zuerst über mehrere Jahre hinweg gekühlt. Sie werden anschließend zu einem Zentralen Zwischenlager, CLAB, an dem Atomkraftwerk Oskarshamn transportiert. Das Nasslager verfügt über zwei Wasserbecken in Kavernen, die sich 50 Meter unter der Erdoberfläche in Granitgestein befinden. Die abgebrannten Brennelemente werden von den anderen Reaktorstandorten mit einem Spezialschiff (Sigrid) transportiert; dieses Schiff wird auch für den Transport anderer radioaktiver Abfälle zwischen den Atomstandorten benutzt.

Schweden hat sich, wie viele andere Länder, über einen langen Zeitraum hinweg mit der tiefengeologischen Endlagerung für hochradioaktive Abfälle beschäftigt. Seit Mitte der 1970er Jahre hat die Atomindustrie ein Endlagersystem mit dem Namen KBS-3 für die tiefengeologische Endlagerung von abgebrannten Brennelementen entwickelt. Ein Endlager ist in einer Tiefe von 500 Metern in Granitgestein geplant. Die abgebrannten Brennelemente sollen in einen 5 cm dicken Kupferbehälter eingekapselt und in Bohrlöchern im Boden von unterirdischen Tunneln gelagert werden. Um die Behälter herum muss ein Puffer aus Bentonit geschaffen werden, und auch die Tunnel werden mit Ton gefüllt. Durch das Granitgestein fließt Wasser, aber Kupfer und Ton sind dazu gedacht, eine künstliche Barriere zu bilden, um die Abfälle über Hunderttausende von Jahren von der Umwelt zu isolieren.

Das Verfahren zur Auswahl des Standorts für dieses Endlager war lang und kompliziert. Schließlich hat SKB im Jahre 2009 die Gesteinsformation am Atomkraftwerk Forsmark ausgewählt. Im Jahre 2011 wurde ein Genehmigungsantrag eingereicht, und die Aufsichtsbehörde SSM und der Umwelt-Gerichtshof haben ihre Gutachten im Januar 2018 nach einem langen Verfahren an die Regierung geleitet. Das Gericht hat die Empfehlung ausgesprochen, eine Genehmigung gemäß Umweltschutzgesetz abzulehnen, außer es würde nachgewiesen, dass die Integrität der Kupferbehälter eine Langzeitsicherheit in ausreichendem Maß gewährleistet. Die Aufsichtsbehörde SSM hat empfohlen, dass die Regierung die Genehmigung ausspricht, weil man jedwede Probleme mit den Kupferbehältern auch später in einem schrittweisen Entscheidungsprozess gemäß dem Atomgesetz behandeln könne. Der Genehmigungsantrag wird momentan von der Regierung geprüft, und es ist unsicher, ob die Fragen der Kupferkorrosion ein wesentliches Problem in der Zukunft darstellen werden, um das Projekt fortzusetzen. Eine Entscheidung der Regierung könnte im Jahre 2020 erfolgen³⁷⁰.

Falls sich die Regierung dazu entscheidet, ja zu sagen, wird sie zuerst „die Erlaubnis“ gemäß den Umweltschutzvorschriften geben und anschließend Bedingungen hinzufügen. Der Umwelt-Gerichtshof muss eine Genehmigung mit Bedingungen erteilen. Die Regierung wird anschließend eine Genehmigung gemäß dem Atomgesetz erteilen, und die Aufsichtsbehörde SSM wird damit beginnen, das schrittweise Genehmigungsverfahren durchzuführen, wobei eine Teilgenehmigung jeweils für den Baubeginn, für den Betrieb und für den vollständigen Betrieb gegeben wird. Dieses Verfahren dauert mehrere Jahre, und es ist unwahrscheinlich, dass der Baubeginn vor 2025 liegt. Falls eine Genehmigung gewährt wird, wird davon ausgegangen, dass es 10 Jahre dauern wird, das Endlager zu bauen und dass dies für ungefähr 60 Jahre in Betrieb sein wird.

³⁷⁰ Bis Mitte 2020 hatte die Regierung keine offizielle Entscheidung angekündigt.

Zusätzlich zu dem geplanten tiefengeologischen Endlager für HLW sind mehrere Endlager für andere Abfallarten in Betrieb oder geplant:

- Es gibt Pläne für ein spezielles Endlager mit der Bezeichnung SFL für langlebige, schwach- und mittlerradioaktive Abfälle (LILW-LL). Allerdings hat SKB noch kein Verfahren vorgelegt oder den Prozess der Suche nach potentiellen Standorten begonnen.
- Es gibt ein Zwischenlager für hauptsächlich LILW-LL in einer Felskaverne am Standort Studsvik. Die Abfälle stammen aus verschiedenen Quellen, größtenteils handelt es sich hierbei um Hinterlassenschaften.
- Ein Endlager mit der Bezeichnung SFR wurde im Jahre 1983 für kurzlebige, schwach- und mittlerradioaktive Abfälle (LLW-SL und ILL-SL) aus Atomkraftwerken in Betrieb genommen. Das Endlager befindet sich 75 Meter unter dem Meeresboden außerhalb des Atomkraftwerks Forsmark. Es existiert ein fortlaufendes Genehmigungsverfahren für eine geplante Erweiterung bis 120 Meter unter dem Meeresboden für Abfälle aus der Stilllegung. Es hat Probleme in Bezug auf die Unversehrtheit der Betonbarrieren und in Bezug auf Korrosion der Behälter in dem SFR-Endlager gegeben. Darüber hinaus gibt es eine Anzahl von Behältern mit Abfällen aus der Vergangenheit, wovon viele zurückgeholt werden müssen, weil es unsicher ist, was sich in den Behältern befindet oder weil jetzt bekannt geworden ist, dass diese langlebige Abfälle enthalten.
- An dem Standort des Forschungsreaktors Studsvik werden in einer „Heißen Zelle“ kommerzielle Tests an Proben von abgebrannten Brennelementen durchgeführt. Die Anlage beinhaltet außerdem eine Verbrennungsanlage zur Verdichtung von radioaktiven Abfällen und eine Schmelzanlage zur Dekontamination und zum Schmelzen von radioaktivem Material zur Freigabe. Die Anlagen in Studsvik wurden schrittweise, beginnend in den 1980er Jahren, privatisiert. Im Jahre 2017 hat Cyclife, die Tochtergesellschaft des französischen Versorgungsunternehmens EDF, den Großteil der Anlagen von Studsvik AB gekauft, jedoch nicht die „Heiße Zelle“.
- Es existieren oberirdische Deponien für sehr schwach radioaktive Abfälle an den Standorten von Atomkraftwerken in Ringhals, Forsmark und Oskarshamn und an dem Standort Studsvik. Die Deponie in Studsvik ist dauerhaft geschlossen.

KOSTEN UND FINANZIERUNG

Im internationalen Vergleich hat Schweden frühzeitig die Finanzierung des Managements von radioaktiven Abfällen beschlossen, wie dies in dem ursprünglichen Finanzierungsgesetz von 1981 festgelegt ist. Das Finanzierungsgesetz von 2006 definiert die Verantwortlichkeit des Betreibers von Nuklearanlagen oder von jedwedem, der radioaktive Abfälle produziert, und zwar in Bezug auf die Stilllegung und die Garantie, dass die vollständigen Kosten von dem Erzeuger getragen werden.³⁷¹ Eine Gebühr auf den Strompreis aus Atomkraftwerken und garantierte Sicherheiten durch die Betreiber der Kraftwerke sind die beiden hauptsächlichsten Pfeiler der Finanzierung des Managements von Abfällen und der Stilllegung der Reaktoren. Die Atomindustrie erstellt alle drei Jahre den PLAN-Bericht, zusammen mit Projektionen der zukünftigen Kosten auf der Basis unterschiedlicher Szenarien. Der Bericht liefert Daten für

³⁷¹ Miljödepartementet, „Lag 2006:647 om finansiering av kärntekniska restprodukter“, Gesetz 2006:647, Umweltministerium, Schwedische Regierung, Juni 2006, https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-2006647-om-finansiering-av-karntekniska_sfs-2006-647, Stand 28. Juni 2019.

die Berechnung der Gebühren und für die Sicherheiten in Bezug auf radioaktive Abfälle. Diese Zahlen werden von der Schwedischen Reichsschuldenverwaltung geprüft und außerdem einer öffentlichen Überprüfung vorgelegt. Bis zum Jahre 2018 lag die Verantwortung bei der Aufsichtsbehörde SSM, aber die Verantwortung wurde aufgrund der voraussichtlich steigenden Risiken im Hinblick auf eine Unterfinanzierung des Systems verschoben. Die Schwedische Reichsschuldenverwaltung gibt der Regierung Empfehlungen, die wiederum die endgültige Entscheidung trifft.

Für den Zeitraum 2018-2020 beträgt die durchschnittliche Gebühr SEK 50/MWh (€₂₀₁₇ 5,2/MWh) für Strom aus Atomkraftwerken. Die Gebühr wird für jedes einzelne Atomkraftwerk festgelegt, wobei für Oskarshamn der höchste Satz (SEK 64/MWh oder ca. €₂₀₁₇ 6,7/MWh) und der niedrigste für Forsmark (SEK 33/MWh oder ca. €₂₀₁₇ 3,4/MWh) beträgt. Außerdem legt die Regierung die Höhe von Sicherheitsbeträgen fest, die durch die Betreiber gedeckt werden müssen, und zwar in dem Fall, dass die Gebühren die geplanten Kosten nicht decken und um die Deckung von unerwarteten Kosten zu erlauben. Für den Zeitraum 2018-2020 beträgt der „Finanzbetrag“ der Sicherheiten für eventuelle Kostensteigerungen SEK 29 Milliarden (€₂₀₁₇ 3 Milliarden) und der „komplementäre Betrag“ der Sicherheiten für unvorhergesehene neue Kosten SEK 15 Milliarden (€ 1,7 Milliarden).³⁷²

Die von den Betreibern gezahlten Gebühren werden in den Nuclear Waste Fund – einen speziellen Fonds für Nukleare Abfälle – eingezahlt, der getrennt von dem Regierungsbudget existiert. Am Ende des Jahres 2017 betragen die Rückstellungen in dem Fonds SEK 67 Milliarden (€₂₀₁₇ 6,8 Milliarden). Die gesamten zukünftigen Kosten für das Management und die Endlagerung aller radioaktiver Abfälle sowie der Stilllegung der Atomreaktoren werden auf SEK 100–110 Milliarden geschätzt (€₂₀₁₇ 10,1–11,1 Milliarden).³⁷³ Da die Finanzkrise im Jahre 2008 zu einer sehr viel geringeren Rendite für langfristige Anleihen geführt hat, als dies erwartet wurde, haben sich die Risiken erhöht, dass das System unterfinanziert ist.

Das Finanzgesetz wurde im Jahre 2017 umfassend überarbeitet, um zu versuchen, die Risiken des Finanzierungssystems zu handhaben. Die Finanzmittel in dem Fonds für Nukleare Abfälle können jetzt in weniger sichere Anlageformen als Staatsanleihen investiert werden, um eine höhere Rendite bei dem Fondskapital zu erzielen; es ist der Industrie erlaubt, die Kalkulation auf der Grundlage von verbliebenen Betriebszeiten von 50 Jahren durchzuführen.

Durch Verwendung eines separaten Studsvik-Gesetzes von 1988 hat Schweden bis vor kurzem verlangt, dass die Kosten für das Management und die Entsorgung der Hinterlassenschaften an radioaktiven Abfällen gedeckt werden.³⁷⁴ Für diese Kosten waren auch die Betreiber der Atomkraftwerke verantwortlich, da diese als Nutznießer der frühen Aktivitäten im Bereich der Nuklearforschung betrachtet werden können. Die Gebühr an den Fonds für Nukleare Abfälle betrug ungefähr SEK 1–3/MWh (€₂₀₁₆ 0,1–0,3/MWh) für Atomstrom. Allerdings wurde das System Ende 2017 aufgegeben, und die verbliebenen Verantwortlichkeiten wurden in das überarbeitete Finanzgesetz integriert.

³⁷² SKB, „Plan 2016—Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power“, TR-17-02, April 2017, S. 45–47.

³⁷³ SKB, „Plan 2016—Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power“, TR-17-02, April 2017.

³⁷⁴ Das Gesetz ist benannt nach der Atomforschungsanlage Studsvik, wo der Großteil der atomaren Hinterlassenschaften gelagert ist. Sveriges Riksdag, „Lag (1988:1597) om finansiering av hanteringen av visst radioaktivt avfall m.m.“, Schwedischer Reichstag, Gesetz 1988:1597, https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-19881597-om-finansiering-av-hanteringen-av_sfs-1988-1597.

ZUSAMMENFASSUNG

Das momentane schwedische Governance-System für das Management und die Endlagerung von radioaktiven Abfällen wurde in den frühen 1980er Jahren eingerichtet und legt die Verantwortung für die Finanzierung und Umsetzung eindeutig in den Bereich der Nuklearindustrie.

Schweden verwendet ausschließlich Nasslagerung als Zwischenlagerung für abgebrannte Brennelemente und alle Brennelemente werden zentral in einer Anlage (50 m unter der Erdoberfläche) gelagert. Schweden verfügt über ein in Betrieb befindliches Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle; dieses Endlager befindet sich momentan in einem Verfahren für eine neue Genehmigung, um die Erweiterung des Lagers für Abfälle aus der Stilllegung zu gestatten.

Schweden hat fortgeschrittene Pläne für eine tiefengeologische Endlagerung von abgebrannten Brennelementen. Der Genehmigungsprozess befindet sich in dem Stadium der Entscheidungsfindung durch die Regierung. Es hat Kritik von wissenschaftlicher Seite an der Verwendung von Kupfer als Behältermaterial gegeben; dies macht es unsicher, ob letztendlich eine Genehmigung erteilt wird.

Das schwedische Finanzierungssystem für das Management von radioaktiven Abfällen und der Stilllegung der Reaktoren ist weit entwickelt und transparent. Es stehen beträchtliche Beträge in einem Fonds für Nukleare Abfälle zur Verfügung, aber es gibt auch Diskussionen über die steigenden Risiken, dass das System noch immer unterfinanziert sein wird.

7.6 SCHWEIZ

ÜBERBLICK

Im Gegensatz zu den großen Ländern, die Atombomben entwickelt und gebaut haben, kann man die Schweiz als Nuklearen Mitläufer bezeichnen. Von Anfang an bedeutete die begrenzte Größe des Landes, dass es weder die finanziellen noch menschlichen Ressourcen haben würde, um ein solch ambitioniertes Programm durchzuführen, wie dies der Bau eines hochsensiblen nuklearen Entwicklungsprojekts sein würde. Nichtsdestoweniger wurde für die Schweiz nach dem 2. Weltkrieg eine atomare Aufrüstung in Betracht gezogen. Diese Episode ist wichtig, weil sie entscheidenden Einfluss auf die späteren Strukturen in dem Nuklearbereich des Landes hatte. Darüber hinaus wurde Genf zu einem Ort von diversen internationalen Konferenzen zu Atomenergie ab dem Jahre 1955. Im Anschluss an die Erste Internationale Konferenz zu Atomenergie im Jahre 1955 hat die Schweiz den Schwimmbadreaktor erworben, der zu dem Zeitpunkt von den USA mit extrem günstigen Bedingungen präsentiert worden war. Dieses Projekt legte den Grundstein für den Einstieg der Schweiz in die Nutzung der Atomenergie.

In den 1960er Jahren hat die Schweiz ihre eigene Schwerwasser-Reaktorlinie entwickelt und in einer Kaverne in der westlichen Schweizer Gemeinde von Lucens umgesetzt.³⁷⁵ Im Jahre 1969, wenige Monate nach dem Betriebsbeginn, ereignete sich eine teilweise Kernschmelze. Dieses Ereignis war das de facto Ende der Schweizer Ambitionen im Hinblick auf atomare Aufrüstung. 1988, hat sich die Schweiz aus dem militärischen Waffenprogramm zurückgezogen.³⁷⁶

Zwischen 1969 und 1984 gingen fünf Reaktoren mit Leistungen zwischen 350 und 1.000 Megawatt an den Standorten Beznau und Leibstadt, Mühleberg und Gösgen ans Netz.³⁷⁷ Die Erweiterung der Atomkraftwerke an fünf weiteren Standorten wurde hauptsächlich aufgrund des Widerstands, der in den 1970er Jahren entstand, und aufgrund des überdimensionierten Programms aufgegeben. Im Jahre 2018 leistete Atomkraft einen Beitrag von ungefähr 40 Prozent an der Stromversorgung der Schweiz.³⁷⁸ Ein Ausbau der Atomenergie in der Zukunft ist unwahrscheinlich. Das Atomenergiegesetz von 2003 legt fest, dass der Bau und der Betrieb einer Atomanlage eine allgemeine Genehmigung vom Bundesrat benötigt.³⁷⁹ Die Atomindustrie in der Schweiz zielt darauf ab, die Suche nach Standorten für Endlager für schwach- und mittelradioaktive und hochradioaktive Abfälle voranzubringen und abzuschließen, bevor neue Reaktortypen kommerziell verfügbar sind.

Die Schweiz hat keine Uranbergwerke und verfügt über keine Urananreicherung oder Herstellung oder Wiederaufarbeitung von Brennelementen. Ein zehnjähriges Moratorium in Bezug auf den Export von bestrahlten Brennelementen zur Wiederaufarbeitung trat im Jahre 2006 in Kraft und wurde kürzlich bis zum Jahre 2020 verlängert.³⁸⁰ Im Jahre 2016 war die Rücknahme der wiederaufgearbeiteten und ver-

³⁷⁵ Fritz Aemmer et al., „Geschichte der Kerntechnik in der Schweiz—Die ersten 30 Jahre 1939–1969“, SKG, Schweizerische Gesellschaft für Kernfachleute, 1992, *Olythus Verlag für verständliche Wissenschaft und Technik*.

³⁷⁶ Tobias Wildi, „Der Traum vom eigenen Reaktor“, 2003, *Chronos Verlag*.

³⁷⁷ Roland Naegelin, „Geschichte der Sicherheitsaufsicht über die Schweizerischen Kernanlagen: 1960–2003“, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2007.

³⁷⁸ Statista, „Anteil des atomar erzeugten Stroms an der gesamten Stromproduktion in der Schweiz von 2003 bis 2017“, 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29583/umfrage/anteil-der-atomenergie-an-der-stromerzeugung-in-schweiz-seit-1998/>, Stand 10. Mai 2019.

³⁷⁹ Diese Vorschrift wurde bereits durch die Bundesverordnung vom 10. Oktober 1978 eingeführt und durch das Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, Artikel 10 und 13, angenommen, in deutscher Sprache unter: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20010233/201801010000/732.1.pdf>, Stand 1. Januar 2018.

³⁸⁰ Schweizer Parlament, „Moratorium für die Ausfuhr abgebrannter Brennelemente zur Wiederaufarbeitung, Verlängerung“, Debatten im Schweizer Parlament, Amtliches Bulletin, 15.079, 2016, <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/amtliches-bulletin/amtliches-bulletin-die-verhandlungen?SubjectId=37419>, Stand 28. Juni 2019.

glasten Abfälle aus den Wiederaufarbeitungsanlagen von La Hague und Sellafield und damit das Kapitel der Wiederaufarbeitung (Plutonium-Brennstoffkreislauf) für die Schweiz beendet.³⁸¹

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Die Schweiz begann mit der Entwicklung ihres Klassifizierungssystems für Abfälle in den späten 1970er Jahren, wobei hauptsächlich eine Strategie von zwei Endlagern verfolgt wurde.³⁸² Über Jahrzehnte hinweg wurde dieses Klassifizierungssystem verfeinert, um Daten über die Mengen an radioaktiven Abfällen zur Verfügung zu stellen, die heutzutage unter dem Namen Modellhaftes Inventar für Radioaktive Materialien (oder MIRAM-Bestandsaufnahme) bekannt ist.³⁸³

Die Schweiz klassifiziert Abfälle auf der Basis der Radioaktivität und unterscheidet zwischen abgebrannten Brennelementen (SNF), verglasten Spaltproduktlösungen, alphanotoxischen Abfällen (ATA) mit Werten, die höher liegen als 20.000 Bq/g, und schwach- und mittelradioaktiven Abfällen.³⁸⁴ Tatsächlich folgt die Unterteilung dem Konzept der tiefeingeologischen Endlagerung, welches diese beiden Arten von Endlager vorsieht.

Radioaktive Abfälle mit kurzen und mittleren Halbwertszeiten beinhalten schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus dem Betrieb der Atomkraftwerke und das gesamte Spektrum von Abfällen aus Medizin, Industrie und Forschung.³⁸⁵ Die erstgenannte Kategorie beinhaltet hochradioaktive, abgebrannte Brennelemente, verglaste Abfälle aus der früheren Wiederaufarbeitung und langlebige, mittelradioaktive transuranische Abfälle. In den letzten Jahren hat sich die Schweiz darum bemüht, die sehr kurzlebigen, schwach-radioaktiven Abfälle über Lagereinrichtungen für den radioaktiven Zerfall zu trennen, d.h. dass solche Abfälle entsorgt werden können, ohne deren Radioaktivität in Betracht zu ziehen; dies reduziert die Abfallmenge, die für eine Endlagerung bestimmt ist.

ABFALLMENGEN

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) berichtet jährlich über die Anzahl der in den Zwischenlagern gelagerten Abfallbehälter. Eine Zusammenstellung des Zwischenlagerinventars findet sich in den Berichten der Schweiz für das Gemeinsame Übereinkommen.³⁸⁶ Die Bestandsaufnahme für radioaktive Abfälle in der Schweiz ist einfacher als in vielen anderen Ländern, weil diese Abfälle grundsätzlich nur aus zwei wesentlichen Quellen stammen: Atomkraftwerke sowie Medizin, Industrie und Forschung.³⁸⁷ Dies macht das Management der radioaktiven Abfälle im Vergleich zu anderen Ländern relativ einfach.

³⁸¹ Nuklearforum Schweiz, „Letzter Transport von Wiederaufarbeitungsabfällen in die Schweiz“, 21. Dezember 2016, <https://www.nuklearforum.ch/de/aktuell/e-bulletin/letzter-transport-von-wiederaufarbeitungsabfaellen-die-schweiz>, Stand 22. April 2019.

³⁸² VSE, GKBP, UeW und NAGRA, „Die nukleare Entsorgung in der Schweiz“, Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, Gruppe der Kernkraftwerkbetreiber und –Projektanten, Konferenz der Überlandwerke, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 9. Februar 1978.

³⁸³ Nagra, „Modellhaftes Inventar für Radioaktive Materialien—MIRAM 08“, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht 08-06, Juli 2008.

³⁸⁴ ENSI, „Abfallbewirtschaftung im Vergleich—Forschungsprogramm ‚Radioaktive Abfälle‘ der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung“, Projektbericht, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI 33/188, Februar 2015, S. 53.

³⁸⁵ IAE0, „Predisposal Management of Radioactive Waste from the Use of Radioactive Material in Medicine, Industry, Agriculture Research and Education“, IAEA Safety Standards Series, Nr. SSG-45, Januar 2019.

³⁸⁶ ENSI, „Implementation of the obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management—6th National Report of Switzerland in Accordance with Article 32 of the Convention“, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Oktober 2017, https://www.ensi.ch/wp-content/uploads/sites/5/2017/10/Joint_Convention-Sixth_national_report-Switzerland_2017.pdf, Stand 22. April 2019.

³⁸⁷ Roland Naegelin, „Geschichte der Sicherheitsaufsicht über die Schweizerischen Kernanlagen: 1960–2003“, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2007.

Allerdings sind die radioaktiven Abfälle der Schweiz in Bezug auf den darin enthaltenen Anteil an Schwermetallen und organischen Substanzen heterogen. Darüber hinaus gibt es unterschiedliche Reaktortypen und somit unterschiedliche Brennelemente, die verwendet werden, und es gibt unterschiedliche Abbrände, einschließlich der aus dem Unfallreaktor mit Kernschmelze in Lucens und dem DIORIT-Forschungsreaktor.

Die nachfolgende Tabelle listet die Abfallmengen auf, die momentan in Zwischenlagern gelagert sind.

TABELLE 18: Radioaktive Abfälle in der Schweiz – Stand 2016

Abfallart	Art der Lagerung	Lagerstandort	Menge
SNF + HLW	Zwischenlagerung (nass, teilweise trocken)	Reaktor-Lagerbecken und Zwischenlager ZWIBEZ am Reaktorstandort	688,8 tHM
	Zwischenlagerung (nass)	Atomkraftwerk Gösgen, Lagerbecken und zusätzliches Nasslager	238 tHM
	Zwischenlagerung (trocken)	Zentrales Zwischenlager ZZL	450,4 tHM
ATA*	Zwischenlagerung	Zentrales Zwischenlager ZZL	99 m ³
	Zwischenlagerung	Zentrales Zwischenlager BZP (PSI)	83 m ³
LILW*	Zwischenlagerung	Reaktorlager und ZWIBEZ	3.865 m ³
	Zwischenlagerung	Zentrales Zwischenlager ZZL	2.339 m ³
	Zwischenlagerung	Zentrales Zwischenlager BZL (PSI)	2.109 m ³

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf ENSI (2017).

Anmerkungen: *ATA (Alphatoxische Abfälle) und LILW, sowohl konditioniert als auch nicht-konditioniert.

BZL = Bundeszwischenlager; PSI = Paul-Scherer-Institut;

ZWIBEZ = Zwischenlager Beznau; ZZL = Zentrales Zwischenlager.

Das aus der Wiederaufarbeitung stammende Plutonium wurde für MOX-Brennelemente verwendet. Im Jahre 2013 betrug der Lagerbestand an Plutonium 1 kg. Außerdem existieren noch frühere Plutoniumreserven von 20 kg, die unter strikten Sicherheitsbedingungen am Paul-Scherer-Institut über Jahrzehnte hinweg gelagert wurden, bis sie letztendlich im Jahre 2016 in die USA exportiert wurden, nachdem sie mit Uran vermischt worden waren, um sie unterhalb der Grenze der Waffenfähigkeit zu halten. Zusätzlich zu diesen Beständen wurden mehr als 5.000 Tonnen radioaktive Abfälle zwischen 1969 und 1982 in den Atlantik verklappt.

Die bis zum Jahre 2075 erwarteten Abfallmengen sind in den von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), freigegebenen Berichten nach Abfallkategorie und Anlage aufgeführt. Die geschätzte Gesamtmenge der bei einer erwarteten Betriebszeit von 60 Jahren in der Schweiz angefallenen radioaktiven Abfälle beläuft sich auf ungefähr 4.000 Tonnen abgebrannte Brennelemente und HLW und 63.000 m³ LILW. Außerdem werden 20.000 m³ LILW aus Medizin, Industrie und Forschung erwartet.³⁸⁸

³⁸⁸ Nagra, „Radioaktive Abfälle, woher, wieviel, wohin?“, 2008, Nachdruck März 2017, [https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/\\$default/Default%20Folder/Publikationen/Broschueren%20Themenhefte/d_th2_RadAbfall_2017.pdf](https://www.nagra.ch/data/documents/database/dokumente/$default/Default%20Folder/Publikationen/Broschueren%20Themenhefte/d_th2_RadAbfall_2017.pdf), Stand 16. Mai 2019.

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

Das Atomenergiegesetz von 2003 ist das zentrale politische Instrument zur Regulierung radioaktiver Abfälle in der Schweiz. Das Konzept der tiefengeologischen Endlagerung wurde durch die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für Radioaktive Abfälle (EKRA) entwickelt.³⁸⁹

Seit 1972 haben die Betreiber der Atomkraftwerke und die Bundesregierung zusammen die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) gesteuert. Diese ist verantwortlich für die Planung und die Umsetzung der Endlagerung radioaktiver Abfälle, und sie wird überwacht durch das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). Während der Planungsphase (wie das Standortauswahlverfahren in dem Sektorenplan für tiefengeologische Endlager) kann die Sicherheitsbehörde ENSI keine Entscheidungen treffen, sondern nur Erklärungen abgeben.³⁹⁰ Das Bundesamt für Energie (BFE) und das Eidgenössische Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) sind verantwortlich für die Genehmigung. Die Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) begleitet das Programm als eine Körperschaft mit einer zweiten Meinung, und der Bundesrat oder UVEK treffen die formalen Entscheidungen.

Zu Anfang werden die Abfälle in Lagerbecken an den Atomkraftwerken über mehrere Jahre hinweg gelagert, um anschließend zu den Zwischenlagern transportiert zu werden. Für hochradioaktive Abfälle existieren drei Zwischenlager:

- das Zwischenlager Gösgen für die Nasslagerung von abgebrannten Brennelementen aus dem Atomkraftwerk Gösgen;
- das Zwischenlager ZWIBEZ in Beznau zur Trocken-Zwischenlagerung in Lagerbehältern von abgebrannten Brennelementen aus den Reaktoren in Beznau;
- das Zwischenlager ZWILAG in Würenlingen, ein zentrales Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle und für verglaste Abfälle aus der früheren Wiederaufarbeitung.

Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle werden an verschiedenen Standorten in der Nähe der Atomkraftwerke und im ZWILAG gelagert. Außerdem existiert ein Bundeszwischenlager neben dem ZWILAG in Würenlingen, welches Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung aufnimmt.

Insgesamt sind die Lagerkapazitäten ausreichend. Allerdings sieht sich die Zwischenlagerung der Schweiz anderen Herausforderungen gegenüber, wie z.B. die Verteilung der Abfälle auf die diversen Atomkraftwerke und Anlagen und den temporären Charakter der Zwischenlager. Insbesondere resultieren diese Bedingungen über längere Zeiträume hinweg in erhöhten Risiken.

Die Schweiz hat ihr Sektorenplan-Verfahren für tiefengeologische Endlager im Jahre 2008 begonnen. Dieser Plan zielt ab auf die Festlegung eines oder mehrerer tiefengeologischer Endlager für radioaktive Abfälle in drei Stufen.³⁹¹ Das für die hochradioaktiven Abfälle ausgewählte Wirtsgestein ist Opalinuston, eine ungefähr 100 Meter dicke Tonschicht, die in einem Sediment oberhalb des kristallinen Untergrunds liegt. Es wurden drei Standorte entlang der Grenze zu Deutschland ausgewählt, wobei die Priorität für das Gebiet

³⁸⁹ EKRA, „Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle“, Expertengruppe Entsorgungskonzepte für Radioaktive Abfälle, Schlussbericht, im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 31. Januar 2000.

³⁹⁰ Martina Munz, „Hat das Ensi im Sachplanverfahren geologische Tiefenlager Beratungs- und Aufsichtsfunktion?“, Interpellation im Schweizer Parlament Nummer 16.4056, 15. Dezember 2016. Der Bundesrat antwortete am 15. Februar 2017.

³⁹¹ ENSI, „Sachplan geologische Tiefenlager (SGT)“, ENSI Website, o.D., <https://www.ensi.ch/en/waste-disposal/deep-geological-repository/sectoral-plan-for-deep-geological-repositories-sgt>, Stand 28. Juni 2019.

Zürcher Weinland in der Nähe der Stadt Schaffhausen besteht. Der Bau, das Schließen und die Überwachung der Endlager werden schätzungsweise mehr als ein Jahrhundert dauern. Das Konzept der tiefeologischen Endlagerung ist dazu gedacht, die Rückholung der Abfälle bis zum Ende des Betriebs zu erlauben.

Der Plan für tiefeologische Endlager soll eine umfassende Beteiligung der regionalen und lokalen Bevölkerung garantieren. Allerdings ist dies in der Praxis auf das Angebot von Anhörungen und die Verfügungstellung von Informationen beschränkt. Die Entscheidungen, insbesondere in Bezug auf Sicherheit und Standortfragen, werden ausschließlich durch die Nagra oder die Behörden getroffen. Die Nagra geht davon aus, dass ein tiefeologisches Endlager frühestens 2060 zur Verfügung stehen wird.³⁹²

KOSTEN UND FINANZIERUNG

In der Schweiz findet das Verursacherprinzip Anwendung: die Abfallerzeuger sind verantwortlich für die Umsetzung der Programme zum Management der radioaktiven Abfälle. Die wesentlichen Erzeuger sind die Atomkraftwerke, wobei die Mehrzahl direkt oder indirekt im Besitz der öffentlichen Hand sind. Im Jahre 1984 bzw. 2000 hat die Schweizer Regierung zwei Fonds eingerichtet: einen zur Finanzierung der Stilllegung der Atomanlagen und den anderen zur Finanzierung der Endlagerung der Abfälle. Der Bundesrat ist verantwortlich für die Überwachung der Fonds. Er überwacht die Verwaltungskommission des Stilllegungsfonds für Kernanlagen und Entsorgungsfonds für Kernkraftwerke oder STENFO (Stilllegungs- und Entsorgungsfonds).³⁹³ STENFO liefert alle fünf Jahre eine Aktualisierung der Kostenschätzungen für die Stilllegung und die Endlagerung.

Die Betreiber der Atomkraftwerke müssen Gebühren für beide Fonds zahlen. Die Gebühren werden berechnet, um die geschätzten Kosten bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren zu decken.³⁹⁴ Bis 2018 hatten die Betreiber CHF 7,5 Milliarden (€₂₀₁₈ 6,6 Milliarden) in die Fonds eingezahlt, und es wird davon ausgegangen, dass diese insgesamt CHF 24 Milliarden (€₂₀₁₈ 21,32 Milliarden) bezahlen werden.³⁹⁵ Die Kostenkalkulationen unterliegen fortlaufenden Änderungen.

Allerdings haben sich die Kostenschätzungen für die Stilllegung und die Endlagerung der Abfälle um mehr als das Zehnfache im Laufe der vergangenen 30 Jahre erhöht. In den frühen 1980er Jahren haben die Betreiber Kosten für die Stilllegung und Endlagerung von ungefähr CHF 2 Milliarden (€₂₀₁₉ 1,82 Milliarden) erwartet. Zum Jahre 1994 hat die Nagra bereits Schätzungen nur für die Endlagerkosten in Höhe von CHF 4 Milliarden (€₂₀₁₉ 3,6 Milliarden) vorgelegt. Heutzutage werden die Gesamtkosten bei einer Betriebsdauer von 50 Jahren auf ungefähr CHF 25 Milliarden (ca. €₂₀₁₈ 22 Milliarden) geschätzt, zusätzlich zu CHF 2,5 Milliarden (€₂₀₁₈ 2,2 Milliarden) für die MIF [Medizin, Industrie und Forschung]-Abfälle.³⁹⁶ Berechnungen durch die Oxford University gehen von noch höheren Kosten aus.³⁹⁷

³⁹² Nagra, „Technical Report 16-01E—Waste Management Programme 2016 of the Waste Producers“, Dezember 2016; auch auf Deutsch verfügbar, siehe Nagra, „Technischer Bericht 16-01 – Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen“, Dezember 2016.

³⁹³ STENFO, „Stilllegungsfonds für Kernanlagen und Entsorgungsfonds für Kernkraftwerke STENFO“, Stilllegungs- und Entsorgungsfonds, siehe <https://www.stenfo.ch/de/Home>.

³⁹⁴ Der Schweizerische Bundesrat, „Verordnung über den Stilllegungsfonds und den Entsorgungsfonds für Kernanlagen“, 732.17, 7. Dezember 2007, <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20070457/index.html>, Stand 22. April 2019.

³⁹⁵ Swiss Nuclear, „Stand der Finanzierung von Stilllegung und Entsorgung“, 2019, <http://www.swissnuclear.ch/de/Stand-Stilllegungs-und-Entsorgungsfonds.html>, Stand 22. April 2019.

³⁹⁶ BAG, „Der Bund aktualisiert seine Kostenschätzungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle“, Bundesamt für Gesundheit, 30. November 2018, https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radioaktive-materialien-abfaelle/entsorgung-von-radioaktiven-abfaellen/der_bund_aktualisiert_seine_kostenschaetzungen_fuer_die_entsorgung_radioaktiver_abfaelle.html, Stand 22. April 2019.

³⁹⁷ Alexander Budzier, Bent Flyvbjerg et al., „Quantitative Cost and Schedule Risk Analysis of Nuclear Waste Storage“, Oxford Global Projects, 10. Dezember 2018, <https://www.energiestiftung.ch/files/energiestiftung/fliesstextbilder/Studien/QRA%20Report%20V1.0.pdf>, Stand 22. April 2019.

Ein Grund für die Unsicherheit der Kostenschätzungen ist der Mangel an Erfahrung und an Referenzprojekten.³⁹⁸ Dies bezieht sich vor allem auf die Kosten der Endlagerung, bezüglich derer nur die Tunnel-Referenzprojekte zur Verfügung stehen; dies ist sicherlich eine Schwäche dieser Schätzungen. Außerdem wurden die Kosten ausschließlich für tiefengeologische Endlagerprojekte in einer Tiefe von ungefähr 500 Metern berechnet. Andere Varianten der tiefengeologischen Endlagerung (wie die Option mit tiefen Bohrlöchern) waren nicht enthalten.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Management von radioaktiven Abfällen in der Schweiz folgt den internationalen Praktiken, die im Wesentlichen von den großen internationalen Institutionen (IAEO, NEA/OECD) koordiniert werden. Als kleines Land hat die Schweiz niemals eine führende Rolle im Nuklearbereich gespielt, aber die Schweiz hat sich im Wesentlichen an die internationalen Praktiken gehalten.

Das Grundkonzept einer Endlagerung in der Schweiz ist das Mehrbarrieren-Konzept. Der schrittweise Ausstieg aus der Wiederaufarbeitung in den späten 1970er Jahren hat zu einer wesentlichen Änderung bei den Lagerstrategien für hochradioaktive Abfälle geführt. Im Gegensatz zu den verglasten hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung mussten die abgebrannten Brennelemente in spezielle Lagerbehälter aus Stahl oder einer Kombination aus Stahl und Kupfer verpackt werden.

Wie viele andere Länder auch, befindet sich die Schweiz noch in einem sehr frühen Stadium ihres Endlagerprogramms nach mehr als 50 Jahren ihres Nuklearprogramms. Mittlerweile werden hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente weiterhin in Zwischenlagern gelagert, während schwach- und mittelradioaktive Abfälle überwiegend konditioniert und in dezentralen Zwischenlagern gelagert werden. Das Schweizer Konzept für eine tiefengeologische Endlagerung folgt dem ursprünglichen schwedischen Konzept mit einer Tiefe von 500 Metern. Das Standortauswahlprogramm hat begonnen, und es ist beabsichtigt, dieses zum Jahre 2030 zu beenden. Ein tiefengeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle wird nicht vor 2060 zur Verfügung stehen.

In der Schweiz findet – wie auch anderswo – das Verursacherprinzip Anwendung. Die Betreibergesellschaften, die im Wesentlichen mit öffentlichen Mitteln finanziert werden, sind für die Planung und die Umsetzung der Zwischenlagerung und der tiefengeologischen Endlagerung verantwortlich. Die Rückstellungen für die Endlagerung werden in zwei Fonds gemanagt. Die Gesamtkosten für eine Betriebsdauer von 50 Jahren werden auf mindestens CHF 25 Milliarden (ca. €₂₀₁₈ 22 Milliarden) geschätzt. Es bleibt abzuwarten, in welchem Maße das Schweizer Endlagerkonzept, die Organisation eines solchen Programms und das Finanzierungsmodell effektiv sein werden.

³⁹⁸ SES, „Atomstrom müsste massiv teurer sein“, Schweizerische Energie-Stiftung, o.D., <https://www.energiestiftung.ch/atomenergie-kosten.html>, Stand 22. April 2019.

7.7 GROßBRITANNIEN

ÜBERBLICK

Großbritannien gehörte zu den ersten Staaten, die Atomtechnologie entwickelt haben. Dies geschah ursprünglich zum Zwecke der Produktion von Atomwaffen, beginnend in den frühen 1940er Jahren. Der Standort Sellafield (früher Windscale) im Nordwesten von England wurde dazu benutzt, um die ‘Windscale Piles’ für die Produktion von Plutonium für Atomwaffen zu entwickeln. Anschließend wurden Dual-Use-Reaktoren entwickelt, die sowohl zur Produktion von Plutonium als auch zur Stromerzeugung verwendet wurden.³⁹⁹

In Großbritannien hat es drei unterschiedliche Phasen bei der Entwicklung von Atomreaktoren gegeben. Die erste war die Entwicklung des Magnox-Reaktors auf der Basis von Dual-Use-Reaktoren. Diese verwendeten Natururan, waren graphitmoderiert und mit Kohlendioxid gekühlt. Alle diese Reaktoren sind heutzutage abgeschaltet. Eine zweite Phase basierte auch auf Gas-Graphit-Reaktoren, den Fortgeschrittenen Gasgekühlten Reaktoren (AGR), die jetzt angereichertes Uran verwendeten.⁴⁰⁰ Eine dritte, abgekürzte Phase betraf den Import von Druckwasserreaktoren (PWR), von denen einer im Jahre 1997 fertiggestellt wurde. Atomkraftwerke haben zu Spitzenzeiten im Jahre 1998 mit 28 Prozent zur Stromversorgung in Großbritannien beigetragen, aber dies hat sich schrittweise auf 21 Prozent im Jahre 2017 verringert, weil alte Atomkraftwerke abgeschaltet wurden und weil altersbedingte Probleme die Verfügbarkeit der Atomkraftwerke beeinträchtigen.^{401, 402}

Nach einer langen Pause ist jetzt Hinkley Point C, ein Europäischer Druckwasser-Reaktor (EPR) mit einer ähnlichen Konstruktion wie der frühere PWR, im Bau. Die Planung für fünf weitere große Atomkraftwerke ist jetzt fraglich, weil die Projektträger unter Angabe von finanziellen Problemen die Arbeiten gestoppt haben.⁴⁰³

Der Abriss der alten Atomreaktoren ist ein langsamer Prozess. „Pflege und Wartung“⁴⁰⁴ (ein britischer Begriff) ist der Status, wenn alle Gebäude am Reaktorstandort mit Ausnahme des Reaktorgebäudes, der Lagerbecken und der Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (LILW) abgerissen sind. Diese verbliebenen Anlagen werden dann mit einem Wetterschutz versehen. Es wird erwartet, dass diese Anlagen nach ungefähr 80 Jahren abgerissen werden. Bis jetzt hat nur ein Magnox-Reaktor den Status von „Pflege und Wartung“ erreicht, und die britische Behörde für die Stilllegung von Atomanlagen (NDA – Nuclear Decommissioning Authority) prognostiziert, dass sich die anderen Anlagen bis zum Jahre 2029 in diesem Status befinden werden.⁴⁰⁵

Großbritannien verfügt über ein breites Spektrum an sonstigen Nuklearanlagen. Abgesehen von den Anlagen zur Herstellung von Atomwaffen, umfassen diese anderen Anlagen zwei Reaktoren des Typs Schneller Brüter, diverse Reaktorprototypen und viele andere Forschungseinrichtungen. Großbritannien

³⁹⁹ Rowland F. Pocock, „Nuclear power: Its development in the United Kingdom“, Gresham Books, 1977.

⁴⁰⁰ Gordon MacKerron und Mike Sadnicki, „UK Nuclear Privatisation and Public Sector Liabilities“, STEEP Special Report Nr. 4, Science Policy Research Unit, University of Sussex, 1995.

⁴⁰¹ DECC, „60th Anniversary—Digest of UK Energy Statistics (DUKES)“, Department of Energy and Climate Change, 30. Juli 2009, S. 40.

⁴⁰² BEIS, „Digest of United Kingdom Energy Statistics (DUKES)“, Juli 2018, S. 117.

⁴⁰³ Adam Vaughan, „UK’s nuclear plans in doubt after report Welsh plant may be axed“, *The Guardian*, 10. Dezember 2018, <https://www.theguardian.com/environment/2018/dec/10/uk-nuclear-plant-hitachi-wylfa-anglesey>, Stand 22. April 2019.

⁴⁰⁴ NDA, „Business Plan—1 April 2018 to 31 March 2021“, Nuclear Decommissioning Authority, März 2018, S. 9, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/695245/NDA_Business_Plan_2018_to_2021.pdf, Stand 28. Juni 2019.

⁴⁰⁵ Ibidem.

hat nie Uran abgebaut oder gewonnen, aber das Land verfügt über Anlagen für alle anderen Stadien der nuklearen Brennstoffkette. Dies beinhaltet die Konversion, Anreicherung und Herstellung von Brennelementen sowie die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen zur Abtrennung von Plutonium und Uran. Großbritannien hat zwei große Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield betrieben. Eine Anlage, B205, ist darauf ausgelegt, die Metallbrennstoffe aus den Magnox-Reaktoren wiederaufzuarbeiten; diese Anlage wurde im Jahre 1962 eröffnet und soll im Jahre 2020 geschlossen werden. Die andere ist eine Wiederaufarbeitungsanlage für Oxidbrennstoffe (THORP – Thermal Oxide Reprocessing Plant); diese wurde 1994 eröffnet und 2018 geschlossen.⁴⁰⁶ THORP hat signifikante Mengen an ausländischen Brennelementen wiederaufgearbeitet, im Wesentlichen aus Japan und Deutschland, aber die wesentliche Tätigkeit der Wiederaufarbeitungsanlage war immer die Wiederaufarbeitung von Brennelementen aus den britischen AGRs. Die Anlage wurde weit unterhalb ihrer Kapazität betrieben und wurde aufgrund wirtschaftlicher und technischer Probleme geschlossen. Großbritannien verfügt außerdem über ein in Betrieb befindliches Trockenlager in Sizewell und über Endlagerstandorte für schwachradioaktive Abfälle (LLW) in Drigg, in der Nähe von Sellafield, und in Dounreay in Schottland.

Der Standort Sellafield ist besonders komplex und beherbergt Hunderte von stillgelegten Gebäuden und Lagern. Es bleibt noch viel Arbeit zu tun, bevor die Abfälle überhaupt kategorisiert, geschweige denn sicher gehandhabt werden können.⁴⁰⁷ Wie viele andere Länder, plant auch Großbritannien ein tiefengeologisches Endlager zur Endlagerung von mittelradioaktiven Abfällen (ILW) und hochradioaktiven Abfällen (HLW), aber es wurden bis jetzt nur geringe Fortschritte gemacht. Die Politik Schottlands unterscheidet sich von der in den anderen Teilen von Großbritannien; so plant Schottland eine oberflächennahe Endlagerung aller radioaktiver Abfälle innerhalb seiner Grenzen.⁴⁰⁸

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Das britische Klassifizierungssystem für Abfälle ist eng an das IAEO-System angelehnt. Die Kategorien basieren hauptsächlich auf Radioaktivitätswerten, ohne ausdrücklich in Betracht zu ziehen, ob die Abfälle kurzlebig sind oder nicht. Die nachfolgenden Kategorien werden verwendet:⁴⁰⁹

- sehr schwachradioaktive Abfälle (VLLW): Abfälle mit Radioaktivitätswerten, die niedrig genug sind, um eine Endlagerung überwiegend auf genehmigten Deponien zu gestatten;
- schwachradioaktive Abfälle (LLW): Abfälle mit niedrigen Radioaktivitätswerten, die noch in technischen oberflächennahen Endlagern gehandhabt werden müssen;
- mittelradioaktive Abfälle (ILW): Abfälle mit Radioaktivitätswerten oberhalb der Grenze für LLW, aber ohne Wärmeentwicklung;
- hochradioaktive Abfälle (HLW): Abfälle, die bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen angefallen sind und die sowohl wärmeentwickelnd als auch hochradioaktiv sind.

⁴⁰⁶ NDA und Sellafield Ltd., „End of reprocessing at Thorp signals new era for Sellafield“, Nuclear Decommissioning Authority, 16. November 2018, <https://www.gov.uk/government/news/end-of-reprocessing-at-thorp-signals-new-era-for-sellafield>, Stand 5. April 2019.

⁴⁰⁷ NAO, „The Nuclear Decommissioning Authority: progress with reducing risk at Sellafield“, National Audit Office, HC 1126, 20. Juni 2018, <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/The-Nuclear-Decommissioning-Authority-progress-with-reducing-risk-at-Sellafield.pdf>, Stand 22. April 2019.

⁴⁰⁸ Schottische Regierung, „Scotland’s higher-activity radioactive waste policy“, 20. Januar 2011, <https://www.gov.scot/publications/scotlands-higher-activity-radioactive-waste-policy-2011/>, Stand 22. April 2019.

⁴⁰⁹ BEIS und NDA, „Radioactive Wastes in the UK: UK Radioactive Waste Inventory Report“, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Nuclear Decommissioning Authority, 31 März 2017, <https://ukinventory.nda.gov.uk>, Stand 22. April 2019.

Die Definitionen bezüglich dessen, was Abfälle sind oder nicht, variieren von Land zu Land und über die Zeit. Wie Frankreich, definiert die britische Politik abgetrenntes Plutonium, abgebrannte Brennelemente und abgereichertes oder wiederaufgearbeitetes Uran nicht als Abfälle, und deshalb sind diese nicht in den offiziellen Abfallbeständen enthalten. Diese Entscheidung wird offiziell damit begründet, dass alle diese Materialien zukünftig bei der Herstellung von Brennelementen verwendet werden könnten. Allerdings ist deren Verwendung keinesfalls sicher, und selbst wenn diese bei der Herstellung von Brennelementen verwendet würden, würden diese zu weiteren Abfallströmen führen; und diese erscheinen nicht in den offiziellen Abfallbeständen von Großbritannien.

ABFALLMENGEN

Die britische Regierung veröffentlicht alle drei Jahre ein Inventar von Abfällen. Die nachstehenden Daten stammen aus der letzten Bestandsaufnahme, die die Abfallmengen und Aktivität per 1. April 2016 sowie die zukünftig zu erwartenden Mengen aufführt. Unter anderem ist Folgendes in dem Inventar aufgeführt:

- Es gibt viele verschiedene identifizierte Abfallströme (insgesamt 1.337). Diese Abfallströme sind aufgeteilt in 24 Abfallgruppen.
- Ein hoher Anteil aller radioaktiver Abfälle befindet sich in einem „Rohzustand“ (der britische Begriff lautet „berichteter Zustand“). Dies sind Abfälle, die noch nicht konditioniert oder verpackt sind. Von den 24 Abfallgruppen wird nur eine als „konditionierte Abfälle“ bezeichnet. Während der Anteil der Abfälle in diesem Rohzustand nicht veröffentlicht ist, scheint es wahrscheinlich, dass es sich hierbei um mehr als die Hälfte der Gesamtmengen handelt.
- Flüssige und gasförmige Ableitungen sind nicht in dem Inventar enthalten; deshalb bestehen die aufgelisteten Abfälle ausschließlich aus unterschiedlichen Formen von Feststoffen.
- Der größte Teil der Abfälle unter dem Gesichtspunkt der Radioaktivitätswerte (58 Prozent) ist in Sellafield konzentriert (nur 0,03 Prozent befand sich an militärischen Standorten).
- Das für Großbritannien aufgeführte Inventar beinhaltet keine in ausländischem Besitz befindlichen Abfälle. Einige Substitutionsvereinbarungen zwischen der britischen Regierung und den Regierungen von Eigentümern der in ausländischem Besitz befindlichen Abfälle, die sich in Großbritannien befinden, haben festgelegt, dass die Länder mit in ihrem Eigentum befindlichen Abfällen dieselbe Menge an Radioaktivität zurückerhalten werden, wie diese in den ursprünglichen abgebrannten Brennelementen enthalten war. Allerdings werden diese zurückgeführten Abfälle in Form von HLW ein sehr viel geringeres Volumen haben als die diversen Abfallströme, die während der Wiederaufarbeitung dieser Brennelemente angefallen sind.

Weil Großbritannien in den kommenden Jahrzehnten kein in Betrieb befindliches tiefengeologisches Endlager haben wird, zeigen die britischen Bestände fortlaufend, dass die Mengen und die Aktivitätswerte der hochradioaktiven Abfälle weiterhin anwachsen und dass die erforderlichen Zwischenlagerkapazitäten ständig wachsen.

Tabelle 19 führt die Volumina und Massen der radioaktiven Abfälle auf, die per 1. April 2016 gelagert sind. HLW ergibt sich vollständig als Nebenprodukt bei der Wiederaufarbeitung und wird momentan in Sellafield gelagert. Diese Abfälle existieren ursprünglich in Form von hochradioaktiver Salpetersäure (Hochradioaktive Flüssigkeit oder HAL), die einem Verdunstungsprozess unterzogen werden, bevor sie zu Glasblöcken in Behältern aus rostfreiem Stahl verglast werden.

ILW ist sehr viel unterschiedlicher, und da es momentan an einem Entsorgungspfad mangelt, müssen diese Abfälle gelagert werden. Ungefähr 74 Prozent des Volumens an ILW befindet sich in Sellafield. Fast der gesamte Rest ist an den Atomkraftwerken gelagert. Wenn eine Verpackung erfolgt, kann dies in Zement (in Stahl- oder Betonbehältern) erfolgen oder diese werden mit Polymer ummantelt in Schmiedestahlbehältern verpackt. LLW und VLLW werden routinemäßig entsorgt, sodass die momentan auf eine Endlagerung wartenden Mengen gering sind.

TABELLE 19: Radioaktive Abfälle in Großbritannien – Stand 01. April 2016

Abfallart	Art der Lagerung	Lagerstandort	Menge
SNF (HLW)	Zwischenlagerung (nass)	Lagerbecken an Atomkraftwerken	3.549 tHM
	Zwischenlagerung (nass)	Sellafield	4.151 tHM
HLW	Zwischenlagerung	Sellafield	1.960 m ³
ILW	Zwischenlagerung	Sellafield, Aldermaston, Dounreay, Harwell, AKWs	99.000 m ³
LLW	Zwischenlagerung	Sellafield, Capenhurst, Dounreay	30.100 m ³
	Endgelagerte Abfälle	Geschlossen (in 2005) oberflächennahes Endlager in Dounreay	33.600 m ³
	Endgelagerte Abfälle	Oberflächennahes Endlager in Dounreay	3.130 m ³
	Endgelagerte Abfälle	Oberflächennahes Endlager LLW Endlager in Drigg	905.000 m ³
VLLW	Zwischenlagerung		935 m ³
	Deponien		n.z.

Quelle: Eigene Zusammenstellung basierend auf BEIS/NDA 2017, Neumann (2010).

Anmerkungen: AKW = Atomkraftwerk. Ohne Plutonium und Uran. Großbritannien klassifiziert abgebrannte Brennelemente, Uran und Plutonium nicht als Abfälle.

Die Bedeutung von ILW und insbesondere von HLW resultiert aus den hohen Radioaktivitätswerten im Verhältnis zu LLW und VLLW. HLW enthält bei weitem den größten Teil der Radioaktivitätswerte in den Beständen in Großbritannien, wobei bei vielen Abfällen eine Reduzierung über das nächste Jahrhundert aufgrund des radioaktiven Zerfalls stattfinden wird, obwohl sehr langlebige Radionuklide weiterhin existieren werden, die über Tausende von Jahren isoliert werden müssen.

MENGEN VON SONSTIGEN RADIOAKTIVEN MATERIALIEN, DIE NICHT ALS ABFÄLLE KLASSIFIZIERT SIND

Zu diesem Zeitpunkt klassifiziert Großbritannien Uran, abgetrenntes Plutonium und abgebrannte Brennelemente nicht als Abfälle, weil Plutonium und Uran eventuell als Bestandteile zukünftiger nuklearer Brennstoffe verwendet werden. Allerdings wird eine solche Verwendung in der Praxis sehr unwahrscheinlich sein, und diese Materialien werden wahrscheinlich in Zukunft als Abfälle gehandhabt werden. SNF ist in [Tabelle 19](#) enthalten. Großbritannien wird zum Ende der Wiederaufarbeitung im Jahre 2020 Lagerbestände von abgetrenntem Plutonium von 140 Tonnen haben, hiervon sind 23 Tonnen in ausländischem Besitz. Dies ist der größte Lagerbestand an zivilem abgetrenntem Plutonium.⁴¹⁰ Außerdem

⁴¹⁰ NDA und Sellafield Ltd., „Progress on plutonium consolidation, storage and disposition“, Nuclear Decommissioning Authority, 23. März 2019, <https://www.gov.uk/government/publications/progress-on-plutonium-consolidation-storage-and-disposition>, Stand 22. April 2019.

verfügt Großbritannien per April 2016 über 113.000 tHM natürliches, abgereichertes und wiederaufgearbeitetes Uran, wobei fast alles in Sellafield lagert. Der größte Teil dieser sehr großen Lagerbestände bestand aus abgereichertem Uran nach der Urananreicherung.⁴¹¹

Insgesamt gesehen, werden abgebrannte Brennelemente und Uran – sobald diese endgültig als Abfälle klassifiziert sind – erheblich zur Gesamtaktivität (abgebrannte Brennelemente und Plutonium) und zum Volumen (Uran) der nuklearen Abfälle Großbritanniens beitragen; es besteht die hohe Wahrscheinlichkeit, dass die momentane Politik dies ignoriert. Bei den Beständen in Großbritannien wird außerdem davon ausgegangen, dass sehr große Mengen an Abfällen zukünftig zwischen 2016 und 2125 anfallen werden. In Anbetracht zukünftiger Szenarien, die davon ausgehen, dass es keine zukünftigen Neubauten von Atomkraftwerken geben wird, existieren die nachfolgenden Erwartungen in Bezug auf zukünftige Abfallmengen:⁴¹²

- HLW 366 m³
- ILW 299.000 m³
- LLW 1.570.000 m³
- VLLW 2.720.000 m³

Die zukünftige Menge an HLW ist relativ gering, weil die Wiederaufarbeitung eine begrenzte Zukunft hat. Allerdings geht man davon aus, dass sich die ILW-Mengen ungefähr um das 3-fache und LLW ungefähr um das 1,5-fache erhöhen werden. Der Großteil dieser zukünftigen Abfälle wird aufgrund der Stilllegung der Atomkraftwerke und der Anlagen in Sellafield anfallen (wobei bei letzteren davon ausgegangen wird, dass diese für 62 Prozent aller zukünftiger ILW-Abfälle, 84 Prozent der zukünftigen LLW-Abfälle und 95 Prozent der zukünftigen VLLW-Abfälle stehen werden).

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

In Großbritannien sind Abfälle aus militärischen Aktivitäten aus dem 1940er Jahren und zivile Abfälle aus den 1950er Jahren angefallen. LLW wurde immer oberflächennah entsorgt. Eine seriöse Politik in Bezug auf andere potentielle Abfälle bestand über viele Jahre hinweg ausschließlich in der Verpflichtung zur Wiederaufarbeitung aller abgebrannter Brennelemente. Die Wiederaufarbeitung basierte auf der Überzeugung, dass das Plutonium anfangs für Waffen benötigt werden würde und später erforderlich sein würde, um Brennstoff für Schnelle-Brüter-Reaktoren (FBR) herzustellen. Diese letzte Option hat sich verflüchtigt und im Jahre 1994 wurde die Entwicklung von Schnellen Brütern aufgegeben, die Wiederaufarbeitung jedoch wurde weiterhin betrieben.⁴¹³ Alle ILW-Abfälle wurden in Zwischenlager verbracht.

Die Politik im Hinblick auf Abfälle mit höherer Radioaktivität (ILW und HLW) wurde bis in die 1970er Jahre vernachlässigt, als die ehemalige Königliche Kommission zur Umweltverschmutzung (Royal Commission on Environmental Pollution) empfahl, dass keine neuen Atomkraftwerke entwickelt werden sollten, bis glaubhafte Waste-Management-Pfade aufgezeigt sind.⁴¹⁴ Dies führte zu expliziten Plänen für eine

⁴¹¹ BEIS und NDA, „Radioactive Waste in the UK: Radioactive Wastes and Materials not Reported in the 2016 Waste Inventory“, Department for Business Energy and Industrial Strategy, National Decommissioning Authority, 31 März 2017, S. 16.

⁴¹² BEIS und NDA, „Wastes in the UK: UK Radioactive Waste Inventory Report“, 31. März 2017, S. 23.

⁴¹³ IPFM, „Plutonium Separation in Nuclear Power Programs—Status, Problems, and Prospects of Civilian Reprocessing Around the World“, International Panel on Fissile Materials, 2015.

⁴¹⁴ Royal Commission on Environmental Pollution, „6th report of the Royal Commission on Environmental Pollution—Nuclear Power and the Environment“, Königliche Kommission zur Umweltverschmutzung, 1976, Cm 6618.

tiefengeologische Endlagerung von ILW und – implizit, wenn auch zeitlich später – von HLW. Alle Versuche, dies zu erreichen, sind aufgrund der örtlichen Widerstände an den vorgeschlagenen Standorten gescheitert.

Ein unabhängiges Ausschuss für das Management radioaktiver Abfälle (CoRWM – Committee on Radioactive Waste Management) hat im Jahre 2006 einen Bericht zugunsten eines tiefengeologischen Endlagers für alle Abfälle mit höheren Aktivitätswerten erstellt.⁴¹⁵ Es wurde außerdem eine robuste Zwischenlagerung und ein neues freiwilliges Verfahren vorgeschlagen, bei dem die Bevölkerung vor Ort dazu eingeladen würde, um über die Bedingungen zu verhandeln, unter denen sie die Entwicklung des tiefengeologischen Endlagers akzeptieren würde. Die Regierung hat sich dazu entschieden, diesen generellen Ansatz im Jahre 2008 zu verfolgen, und sie hat einen seriösen (aber gescheiterten) Versuch unternommen, die Zustimmung der Kommunen bei Sellafield zum Bau eines tiefengeologischen Endlagers zu erhalten.⁴¹⁶ Seit dem Frühjahr 2019 ist die Regierung in einem erneuten Verfahren engagiert, mit dem eine Kommune gefunden werden soll, die ein tiefengeologisches Endlager auf ihrem Gebiet akzeptiert.⁴¹⁷

Das britische Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriestrategie (BEIS) ist verantwortlich für die Politik im Zusammenhang mit radioaktiven Abfällen. Die Schließung der Magnox-Reaktoren und der erbärmliche und sich verschlechternde Zustand in Sellafield hat es in den frühen 2000er Jahren deutlich gemacht, dass eine kohärentere Politik und höhere Ausgaben erforderlich sind, um radioaktiven Abfälle kurz- und langfristig zu managen. Das Energiegesetz von 2004 hat die Basis für die Einrichtung der Aufsichtsbehörde für die Stilllegung von Atomanlagen (NDA – Nuclear Decommissioning Authority) im Jahre 2005 geschaffen.⁴¹⁸ Der Zweck der Behörde besteht darin, die Stilllegung und die Aufräumarbeiten aller in öffentlichem Besitz befindlichen Nuklearstandorte durchzuführen und darüber hinaus das langfristige Management radioaktiver Abfälle zu übernehmen. Es ist das erste Mal, dass in Großbritannien eine Institution entwickelt worden ist, die dem vorrangigen Zweck des Managements von radioaktiven Abfällen dient.

Die NDA hat anerkannt, dass Sellafield der problematischste Standort ist, weil dieser ein riesiges Spektrum an ehemals militärischen und ehemals zivilen Gebäuden und Abfällen enthält. Sellafield enthält vier sogenannte Teiche und Silos mit Hinterlassenschaften, von denen hohe Risiken ausgehen und die praktisch alle abgebrannten Brennelemente Großbritanniens enthalten, von denen viele an diesem Standort wiederaufgearbeitet wurden. Das bedeutet, dass die Aufräumarbeiten in Sellafield die höchste Priorität für die NDA darstellen.⁴¹⁹

Die NDA hat versucht, Innovationen bei dem Management der Atomstandorte einzubringen, die sie jetzt besitzt. Insbesondere hat sie wettbewerblich ausgeschrieben, um „Dachorganisationen“ (PBOs – Parent Body Organisations) zu benennen, um die Arbeiten der für den Standort lizenzierten Unternehmen an jedem einzelnen Standort für bestimmte Zeiträume zu beaufsichtigen. Diese Wettbewerbsprozesse waren darauf ausgelegt, Kosteneinsparungen herbeizuführen und eine breiter-angelegte interna-

⁴¹⁵ CoRWM, „Managing our Radioactive Waste Safely–CoRWM’s recommendations to Government“, Doc 700, 2006.

⁴¹⁶ DEFRA, BERR, und die Behörden von Wales und Nordirland, „Managing radioactive waste safely: – A Framework for Implementing Geological Disposal“, Ministerium für Umwelt, Nahrung und ländlichen Raum, Ministerium für Energie und Klimawandel, Juni 2008, <https://www.gov.uk/government/publications/managing-radioactive-waste-safely-a-framework-for-implementing-geological-disposal>, Stand 24. April 2019.

⁴¹⁷ World Nuclear News, „UK relaunches repository site selection process“, 20. Dezember 2018, <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/UK-relaunches-repository-site-selection-process>, Stand 22. April 2019.

⁴¹⁸ Britische Regierung, „Energy Act 2004“, 2004, c. 20, https://www.legislation.gov.uk/id/ukpga/2004/20/pdfs/ukpga_20020020_en.pdf, Stand 28. Juni 2019.

⁴¹⁹ NAO, „The Nuclear Decommissioning Authority: progress with reducing risk at Sellafield“, HC 1126, 20. Juni 2018, Teil 2.

tionale Expertise miteinzubeziehen. Allerdings hat dieses Modell nicht gut funktioniert, und die NDA übernimmt jetzt die direkten Management-Verantwortlichkeiten für die beiden größten Bereiche der Stilllegung und der Aufgaben des Waste-Managements in Großbritannien: Sellafield und die Magnox-Standorte.⁴²⁰

Abgesehen von den Endlagern für LLW in der Nähe von Sellafield und Dounreay verfügt Großbritannien über keine weiteren langfristigen Lagerstandorte. Zwischenlagerung wird, wie dies in Tabelle 19 aufgelistet ist, für alle anderen Abfälle an vielen Standorten praktiziert, obwohl Sellafield den Großteil aller Abfälle im Hinblick auf Menge und Radioaktivität beherbergt.

KOSTEN UND FINANZIERUNG

Die Gesamtkosten für das Management aller radioaktiver Abfälle Großbritanniens sind sehr hoch. Die NDA erstellt Schätzungen in Bezug auf die zukünftigen Kosten der „Hinterlassenschaften“ an Abfällen des öffentlichen Sektors. Diese Hinterlassenschaften decken Abfälle ab, die entweder in der Vergangenheit angefallen sind oder die in Zukunft unvermeidbar sein werden (hauptsächlich aufgrund der Notwendigkeit, viele Nuklearanlagen stillzulegen). Per 2006 hat die NDA die nicht-diskontierten zukünftigen Kosten ihrer Aufgaben auf £ 53 Milliarden (ca. € 78,6 Milliarden in 2006) geschätzt. 2018 haben sich diese Kosten auf eine Schätzung von £ 121 Milliarden erhöht (€ 136,7 Milliarden), wobei die Kosten für Sellafield, wo sich die Erhöhung konzentriert hat, mit £ 91 Milliarden (€ 102,9 Milliarden) erwartet werden. Die NDA gibt jetzt eine Unsicherheitsspanne bei der zentralen Schätzung von £ 99 – 225 Milliarden (€ 111,8–254,2 Milliarden) an.⁴²¹ Es wird erwartet, dass Ausgaben bis ungefähr 2125 entstehen werden.

Großbritannien blickt auf einen negativen historischen Rekord in Bezug auf die Finanzierung des Umgangs mit den Abfällen zurück. Es wurden nur für sehr kurze Zeiträume getrennte Fonds mit geringen Beträgen für radioaktive Abfälle des öffentlichen Sektors zurückgelegt, und diese wurden alle aufgegeben. Momentan existieren drei verschiedene Finanzierungssysteme:

- Für die Abfälle des öffentlichen Sektors besteht das Hauptsystem in einer jährlichen Beihilfe durch die Regierung, da es keinerlei Finanzmittel gibt, um für die Abfälle des öffentlichen Sektors zu zahlen. Diese Beihilfe finanziert die NDA, und dieser Betrag wird aufgestockt durch die Einkünfte, die die NDA aus ihren Dienstleistungen, wie das Management von abgebrannten Brennelementen via Aufarbeitung und die langfristige Zwischenlagerung für abgebrannte Brennelemente, erhält. In den Jahren 2017 – 2018 beliefen sich die kommerziellen Einkünfte auf insgesamt £ 1,2 Milliarden (€ 1,4 Milliarden), wobei der Großteil hiervon für Dienstleistungen im Bereich abgebrannter Brennelemente generiert wurde. Die Beihilfe der britischen Regierung betrug £ 2,1 Milliarden (€ 2,4 Milliarden), wodurch die Gesamtausgaben in 2017–2018 ungefähr £ 3,3 Milliarden (€ 3,7 Milliarden) betragen. Hiervon wurden sechzig Prozent für Sellafield ausgegeben. Die Gesamtausgaben der NDA betragen ungefähr £ 3 Milliarden (ca. € 3,4 Milliarden) für mehrere Jahre. Zukünftig werden die wirtschaftlichen Einkünfte aus den Dienstleistungen im Zusammenhang mit abgebrannten Brennelementen stark fallen, weil sämtliche Wiederaufarbeitungsaktivitäten im Jahre 2020 gestoppt werden.

⁴²⁰ Simon James, „Magnox becomes NDA subsidiary“, *Nuclear Matters*, 4. Juli 2018, www.nuclearmatters.co.uk/2018/07/magnox-becomes-nda-subsidiary, Stand 22. April 2019.

⁴²¹ NDA, „Annual Report and Accounts 2017 to 2018“, Nuclear Decommissioning Authority, 2018, <https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2017-to-2018>, Stand 22. April 2019.

- Das zweite Finanzierungssystem ist der Nuclear Liabilities Fund (NLF), ein unabhängiger Trust, der momentan über tatsächliche Finanzmittel in Höhe von £ 9,26 Milliarden (ca. €₂₀₁₈ 10,4 Milliarden) verfügt.⁴²² Dieser wird für die Verbindlichkeiten bezüglich der Stilllegung und radioaktiver Abfälle der in Privatbesitz befindlichen, d.h. der AGR-Reaktoren (ohne die fortlaufenden Zahlungen an die NDA für abgebrannte AGR-Brennelemente), verwendet. Diese Reaktoren befinden sich alle im Besitz von EDF Energy. Es wird erwartet, dass der Fonds ausreicht, um den diskontierten Wert der Verbindlichkeiten von EDF Energy zu decken. Qualifizierte Ausgaben müssen durch den Fonds genehmigt werden. Da die Reaktoren noch in Betrieb sind, waren die Ausgaben aus dem Fonds bis jetzt begrenzt, in erster Linie für ein Trockenlager für abgebrannte Brennelemente in Sizewell.

Das dritte System ist ein geplanter Fondgestützter Stilllegungsplan, der auf die neuen Reaktoren Anwendung finden wird. Die Eigentümer der Reaktoren müssen einen Plan entwickeln, der durch die Regierung genehmigt werden muss. Dieser deckt alle zukünftigen Verbindlichkeiten ab und ist darauf ausgelegt, sicherzustellen, dass die Eigentümer der Reaktoren die vollständigen Kosten der Stilllegung und des Waste-Managements tragen.⁴²³ Diese Vereinbarungen werden ein System beinhalten, in welchem ein zukünftiger Abfall-Transferpreis festgelegt wird; zu diesem Zeitpunkt werden die Eigentümer die britische Regierung nach dem Abschalten des Reaktors dafür bezahlen, die Abfälle in ihr Eigentum zu überführen. Die Absicht besteht darin, sicherzustellen, dass dieser Preis hoch genug sein wird, um alle anschließenden Kosten des Waste-Managements mehr als abzudecken.

ZUSAMMENFASSUNG

Großbritannien hat eine Hinterlassenschaft von mehr als 1.300 Abfallströmen und eine Geschichte der Atompolitik, in der das aktive Management der Stilllegung und der Abfälle weitgehend ausgeblendet wurde, bis im Jahr 2005 die NDA eingerichtet wurde. Die zukünftigen Abfallmengen bis zum Jahre 2125 werden voraussichtlich volumenmäßig wesentlich größer als das Inventar per 2016 sein, und es werden in Zukunft mehr Abfälle aus der Stilllegung anfallen.

Die erforderlichen Ausgaben für das Management dieser Abfälle sind extrem hoch und die Aufgabe ist eine große Herausforderung. Der Großteil der zukünftigen Ausgaben im Bereich des Waste-Managements wird aus dem öffentlichen Budget stammen, und es wird erwartet, dass dieser Betrag £ 120 Milliarden (€ 139₂₀₁₉ Milliarden) übersteigt. Abgebrannte Brennelemente und abgetrenntes Plutonium und Uran werden in Großbritannien nicht als Abfälle betrachtet, und das bedeutet, dass die tatsächlichen Abfallmengen höher als die offiziellen Schätzungen sind. Um mit anderen Ländern gleichzuziehen, muss die Politik in Bezug auf hochradioaktive Abfälle die Option der tiefengeologischen Endlagerung verfolgen. Allerdings sind die diesbezüglichen Fortschritte langsam, und es wird wahrscheinlich kein tiefengeologisches Endlager vor 2040 zur Verfügung stehen, dem frühest möglichen Zeitpunkt.

⁴²² NLF, „Annual report and accounts 2018“, Nuclear Liabilities Fund, 21. Dezember 2018, http://www.nlf.uk.net/media/1076/nlf_annual_report_2018.pdf, Stand 22. April 2019.

⁴²³ Britische Regierung, „Energy Act 2008–Funded Decommissioning Programme Guidance for New Nuclear Power Stations“, Dezember 2011, Teil 2b, S. 24–47.

7.8 VEREINIGTE STAATEN VON AMERIKA

ÜBERBLICK

Die USA gehörten zu den ersten Staaten, die Atomtechnologie entwickelt haben, zuerst für die militärische Nutzung. Nach dem 2. Weltkrieg hat das Atoms for Peace („Atome für den Frieden“) Programm zu einer Neuausrichtung signifikanter Forschungsbemühungen in die Richtung von zivilen Atomkraftprogrammen geführt. Das Atomkraftprogramm des Landes begann im Jahre 1959 mit dem Start des Atomkraftwerks Dresden in der Nähe von Morris, Illinois.⁴²⁴ Mitte 2020 waren 95 Reaktoren an 58 Standorten über das ganze Land verteilt in Betrieb; diese tragen zu ungefähr 20 Prozent zu der Stromversorgung der USA bei.⁴²⁵ Nur zwei Reaktoren befinden sich im Bau, beide am Atomkraftwerk Vogtle in Georgia. Hierbei handelt es sich um Westinghouse AP-1000 Reaktoren. Der Bau von zwei zusätzlichen AP-1000 Reaktoren in South Carolina wurde im Juli 2017 aufgrund von Konstruktionsproblemen und Kostenüberschreitungen aufgegeben.⁴²⁶

Die jüngste Entwicklung im Bereich der Atomkraft in den USA geht in die Richtung von Abschaltungen von Reaktoren. Seit 2013 sind acht Reaktoren dauerhaft abgeschaltet worden und bei weiteren 11 Reaktoren droht ein Abschalten bis 2025. Sieben Atomkraftwerke wurden komplett stillgelegt, wobei nur die unabhängigen Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente am Standort verblieben sind. Der kommerzielle Sektor verfügt über ein eigenständiges Lagerbecken in Morris, Illinois. Es wurden sechs Reaktoren an Atomkraftwerken abgeschaltet, bei denen noch Reaktoren in Betrieb geblieben sind. Vier abgeschaltete Atomkraftwerke befinden sich in dem Stadium einer aktiven Stilllegung, während sich fünf weitere Reaktoren in einem Zustand befinden, den die Aufsichtsbehörde NRC (Nuclear Regulatory Commission) als SAFSTOR (der Begriff steht für SAFe STORage, bzw. „Sicherer Einschluss“) bezeichnet; hierbei handelt es sich um einen Zustand des Einschlusses, bei dem eine Anlage so lange eingeschlossen wird, bis sie vollständig rückgebaut werden kann. Die Vorschriften der NRC fordern, dass Anlagen innerhalb von 60 Jahren nach dem Abschalten vollständig abgerissen sein müssen.⁴²⁷

Aufgrund der langen Geschichte des Landes mit Atomkraft existieren unzählige Anlagen der Brennstoffkette in den USA.⁴²⁸ Ganz am Anfang der Kette gibt es eine Uranverarbeitungsanlage in Utah und 11 genehmigte Versickerungsanlagen in den USA, aber nur 5 extrahieren momentan Uran (vier in Wyoming und eine in Nebraska).⁴²⁹ 20 Uranrückgewinnungsanlagen befinden sich im Prozess der Stilllegung.⁴³⁰ Die USA verfügen über eine Uranhexafluorid-Konversionsanlage, die Honeywell-Anlage im südlichen Illinois, die seit Anfang 2018 aufgrund der gefallenen Nachfrage nach Uran als Brennstoff für Atomkraftwerke stillsteht.⁴³¹

⁴²⁴ S. Walker, „Containing the Atom: Nuclear Regulation in a Changing Environment 1963-1971“, University of California Press, 1992.

⁴²⁵ U.S.NRC, „List of Power Reactor Units“, 2019, <https://www.nrc.gov/reactors/operating/list-power-reactor-units.html>, Stand 9. Mai 2019.

⁴²⁶ Brad Plummer, „U.S. Nuclear Comeback Stalls as Two Reactors Are Abandoned“, *The New York Times*, 31. Juli 2017, <https://www.nytimes.com/2017/07/31/climate/nuclear-power-project-canceled-in-south-carolina.html>, Stand 9. Mai 2019.

⁴²⁷ U.S.NRC, „Backgrounder on Decommissioning Nuclear Power Plants“, 15. August 2018, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.html>, Stand 9. Mai 2019.

⁴²⁸ U.S.NRC, „Fuel Cycle Facilities“, 2019, <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac.html>, Stand 9. Mai 2019.

⁴²⁹ U.S. EIA, „Domestic Uranium Production Report – Quarterly“, Energy Information Administration, 2019, <https://www.eia.gov/uranium/production/quarterly/>, Stand 9. Mai 2019.

⁴³⁰ U.S.NRC, „Locations of Uranium Recovery Sites Undergoing Decommissioning“, 2. November 2018, <https://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/uranium/>, Stand 9. Mai 2019.

⁴³¹ Honeywell, Schreiben von Jeff Fulks (Betriebsleiter der Honeywell Anlage) an Craig Erlanger (Direktor der NRC), 11. Januar 2018, <https://www.nrc.gov/docs/ML1802/ML18023A384.pdf>, Stand 28. Juni 2019.

Momentan ist eine Urananreicherungsanlage in den USA in Betrieb, die Zentrifugenanlage der Louisiana Energy Services in Eunice, New Mexico. Diese Anlage ist im Besitz des europäischen Unternehmens Urenco, das bedeutet, dass es keine einzige im Besitz der USA befindliche Urananreicherungsanlage gibt. Die NRC hat der Zentrifugenanreicherungsanlage von AREVA in Eagle Rock, Idaho und der Global Laser Enrichment Anlage von GE Hitachi (GEH) in North Carolina Genehmigungen erteilt, aber keine dieser Anlagen ist gebaut worden. Die American Centrifuge Plant in Piketon, Ohio und die älteren Gasdiffusionsanlagen in Paducah, Kentucky und Portsmouth, Ohio sind alle abgeschaltet.⁴³² Die kommerziellen abgebrannten Brennelemente wurden für einen kurzen Zeitraum, von 1966-1972, in dem West Valley Demonstration Project in West Valley, New York wiederaufgearbeitet, trotzdem befinden sich an diesem Standort beträchtliche Mengen an hoch- und mittelradioaktiven Abfällen.

Die USA produzieren Brennelemente mit schwach- und hoch-angereichertem Uran, obwohl die einheimischen kommerziellen Reaktoren alle Leichtwasserreaktoren (LWR) sind und nur schwach angereicherte Brennelemente verwenden. Die nachfolgenden Anlagen produzieren momentan Brennelemente mit schwach angereichertem Uran: die Anlage Global Nuclear Fuel Americas in Wilmington, North Carolina; die Columbia Fuel Fabrication Facility von Westinghouse in Columbia, South Carolina; und die Anlage von Framatome Inc. in Richland, Washington. Die AREVA-Anlage in Lynchburg, Virginia wurde abgeschaltet. Sowohl die Brennelemente mit schwach als mit hoch angereichertem Uran werden in der Anlage der Nuclear Fuel Services in Erwin, Tennessee und der BWXT Nuclear Operations Group in Lynchburg, Virginia hergestellt.

KLASSIFIZIERUNGSSYSTEM FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE

Das US-amerikanische Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle unterscheidet sich von dem der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) und dem vieler anderer Länder. Aufgrund der langen Geschichte der Entwicklung von Atomwaffen in den USA hat das Land ein breiteres Spektrum an Abfallströmen als andere Länder, die nur über einen kommerziellen Atomkraftsektor verfügen. Um dieses Material zu handhaben, haben die USA ein komplexes Klassifizierungssystem auf der Grundlage von Gesetzen und Vorschriften entwickelt. Die USA verfügen über abgebrannte Brennelemente, hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen (der Großteil hiervon befindet sich in dem Atomwaffenkomplex) und transuranische Abfälle, eine Definition, die nur für Abfälle in dem Atomwaffenkomplex reserviert ist.⁴³³ Diese Abfälle erfordern eine Lagerung in einem tiefeologischen Endlager. Die im Zusammenhang mit dem Atomwaffenkomplex stehenden Abfälle beinhalten außerdem eine relativ neue Kategorie mit der Bezeichnung „Abfälle aufgrund von Wiederaufarbeitung“ („Waste Incidental to Reprocessing“). Dieses Material besteht im Wesentlichen aus dem „heel“ (der Kruste) der Schlämme aus den Tanks der hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen, um Plutonium für Atomwaffen zu extrahieren. Die Entfernung dieses „heels“ aus den Tanks ist schwierig und kostspielig. Das US-amerikanische Energieministerium (DOE – Department of Energy) plant deshalb, diese Abfälle in den unterirdischen Tanks zu belassen, diese mit Vergussmaterial aufzufüllen und hierdurch die Konzentration der Radionuklide über das gesamte Tankvolumen hinweg auszugleichen; hierdurch sollen Durchschnittskonzentrationen erreicht werden, die die Abfälle als schwachradioaktive Abfälle (LLW) klassifizieren.⁴³⁴

⁴³² U.S.NRC, „Fuel Cycle Facilities“, 2019, <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac.html>, Stand 9. Mai 2019.

⁴³³ US-amerikanische transuranische Abfälle enthalten „transuranische“ Elemente, deren Atomanzahl größer ist als die von Uran, und zwar in Konzentrationen von mehr als 10 Nanocurie pro Gramm. Siehe U.S.NRC, „Greater-Than-Class C and Transuranic Waste“, Bundesregister, 83FR6475, 14. Februar 2018, S. 6475-6477, <https://www.federalregister.gov/documents/2018/02/14/2018-03085/greater-than-class-c-and-transuranic-waste>, Stand 9. Mai 2019,

⁴³⁴ Allison Macfarlane, „Incidental nuclear waste: reconceiving a problem won't make it go away“, 31 January 2019, *Bulletin of the Atomic Scientists*, <https://thebulletin.org/2019/01/incidental-nuclear-waste-reconceiving-a-problem-wont-make-it-go-away/>, Stand 9. Mai 2019.

Schwachradioaktive Abfälle sind in den USA im Hinblick darauf definiert, was sie nicht sind. In den entsprechenden Gesetzen sind diese Abfälle als Material definiert, bei welchem es sich nicht um abgebrannte Brennelemente, hochradioaktive Abfälle (HLW) oder Nebenprodukte handelt. Die schwachradioaktiven Abfälle sind in den USA in vier Unterkategorien aufgeteilt, implizit basierend auf der Quelle des Materials. Ob Abfälle die Klasse A, B, C oder die Kategorie „Höher als Klasse C“ haben, ist abhängig von der Präsenz bestimmter Schlüsselradionuklide und den Halbwertszeiten dieser Radionuklide.⁴³⁵ Abfälle der Klasse A, B und C können auf Oberflächendeponien entsorgt werden. Das Energieministerium und die NRC bestimmen momentan, ob die Abfälle „Höher als Klasse C“ in einem tiefengeologischen Endlager gelagert werden müssen.

Die Kritik an dem Klassifizierungssystem für radioaktive Abfälle in den USA konzentriert sich auf die Tatsache, dass das System auf der Quelle der Abfälle und nicht auf den hierdurch entstehenden Risiken basiert. Zum Beispiel können Abfälle der Kategorie HLW und der Klasse A beide dieselben Radionuklide enthalten, aber weil HLW ursprünglich bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen angefallen ist, müssen diese Abfälle anders entsorgt werden als die Abfälle der Klasse A.⁴³⁶ Sonstige Abfallkategorien in den USA beinhalten „Mill Tailings“ (Abraumhalden) und abgereichertes Uran. Letzteres ist nicht geeignet, um in flachen Deponien vergraben zu werden.

ABFALLMENGEN

Obwohl es keine vollständigen Unterlagen hierüber gibt, haben die USA wahrscheinlich die größten und komplexesten Mengen an radioaktiven Abfällen auf der Welt. Es gibt keine offiziellen Berichte über die Mengen an abgebrannten Brennelementen im kommerziellen Sektor, weil die Aufsichtsbehörde keine Berichte über Mengen von abgebrannten Brennelementen verlangt. Die Bestände an sonstigen Abfällen werden sporadisch in unterschiedlichen Regierungsdokumenten veröffentlicht. Unter diesem Vorbehalt zeigt Tabelle 20 eine Schätzung der verschiedenen Abfallmengen in den USA. Die Bundesregierung besitzt große Mengen an hochradioaktiven, transuranischen und schwachradioaktiven Abfällen in einer Reihe von Anlagen. Alle hochradioaktiven Abfälle und abgebrannten Brennelemente werden zwischengelagert. Einige transuranische Abfälle aus den Militärstandorten wurden bereits dauerhaft in dem Waste Isolation Pilot Project (WIPP), einem tiefengeologischen Endlager im Südosten von New Mexico, und an dem Nevada National Security Standort gelagert. Schwachradioaktive Abfälle werden in 18 verschiedenen Regierungsanlagen in den USA gelagert. Die Mill Tailings (Abraumhalden) beinhalten sowohl Abfälle der öffentlichen Hand als auch kommerzielle Abfälle.

Im kommerziellen Sektor verbleiben die abgebrannten Brennelemente an den Atomkraftwerken in Abklingbecken oder in Trockenlagern. Forschungsanlagen, Isotopenproduktion und Testreaktoren verfügen auch über abgebrannte Brennelemente. Abfälle der Klasse A, B und C und schwachradioaktive Abfälle sind in diversen Anlagen gelagert, aber Abfälle der Kategorie „Höher als Klasse C“ verbleiben in Zwischenlagern und es wird auf eine Entscheidung gewartet, wie diese endgültig zu lagern sind.

⁴³⁵ Die NRC bezieht eine Tabelle und einen detaillierten Algorithmus für die Bestimmung der richtigen Kategorie der Abfälle in ihre 10 Vorschriften des Abschnitts 61.55 der Bundesvorschriften (CFR) mit ein.

⁴³⁶ Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, „Report to the Secretary of Energy“, Januar 2012, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/brc_finalreport_jan2012.pdf, Stand 9. Mai 2019.

TABELLE 20: Radioaktive Abfälle in den USA – Stand 31. Dezember 2016

Abfallart	Zwischengelagerte Menge	Endgelagerte Menge
EIGENTÜMER: US-REGIERUNG		
HLW & SNF	14.000 Tonnen	-
TRU (WIPP)	64.630 m ^{3**}	93.500 m ^{3***}
TRU (Nevada, geschlossenes Lager)	-	200 m ³
Abgereichertes Uran	75.296 Tonnen	-
Abraumhalden	228 Millionen Tonnen	-
LLW (Kategorie A, B, C)*	17 Millionen m ³	-
EIGENTÜMER: KOMMERZIELLE BETREIBER		
SNF (HLW)	81.518 Tonnen****	-
SNF (Universität) Forschungsreaktoren	1.042 kgU	-
SNF (Anlagen für Forschungsgund Brennstoffkette)	79 kgU	-
LLW (Standorte in Betrieb)	-	4,8 Millionen m ³
LLW (geschlossene Standorte)	-	438.000 m ³
GTCC	-	130 m ³

Quellen: Zusammenstellung durch das US General Accounting Office (2019), Energieministerium (2009, 2017, 2018, und 2019) und Nuclear Energy Institute (2018).

Anmerkungen: *enthält nicht die zusätzlichen 129 Reaktorbereiche für die oberflächennahe Endlagerung an Standorten von Reaktoren in öffentlicher Hand.

per 31. Dezember 2017. *per Juni 2018. ****per 31. Dezember 2018.

TRU = Transuranische Abfälle; WIPP = Waste Isolation Pilot Project;

GTCC = Greater-Than-Class C/Radioaktive Abfälle der Kategorie „Höher als Klasse C“

Schätzungen zu zukünftigen Abfallmengen liegen nicht vor. Allerdings fallen bei einem Leichtwasserreaktor jährlich ungefähr 20 metrische Tonnen abgebrannte Brennelemente an. In Anbetracht dieser Tatsache wächst die Menge an abgebrannten Brennelementen in den USA um ungefähr 2.000 metrische Tonnen pro Jahr.

ABFALLPOLITIK UND ANLAGEN

Eine Reihe von Gesetzen und Vorschriften dienen als Leitfaden für das Management von radioaktiven Abfällen in den USA. In dem kommerziellen Sektor ist das Energieministerium (Department of Energy – DOE) gesetzlich dafür verantwortlich, hochradioaktive Abfälle, einschließlich von abgebrannten Brennelementen aus kommerziellen Reaktoren, zu managen und zu lagern, wohingegen das Management für schwachradioaktive Abfälle von Privatunternehmen übernommen wird. Das Management und die Lagerung von hoch- und schwachradioaktiven Abfällen werden durch die NRC geregelt.

Nach dem „friedlichen“ Atomtest durch Indien im Jahre 1974 haben die USA eine Politik des „unbeschränkten Aufschubs“ der Wiederaufarbeitung von kommerziellen, abgebrannten Brennelementen begonnen. Obwohl die Politik von diversen (hauptsächlich Republikanern) Präsidenten widerrufen wurde, war die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen zu keinem Zeitpunkt eine ökonomisch sinnvolle Managementoption in den USA. Das West Valley Demonstration Project hat zwischen

1966 – 1972 einige abgebrannte Brennelemente wiederaufgearbeitet, aber dies war niemals wirtschaftlich erfolgreich. Das Eigentum an dem Standort ist anschließend auf das Energieministerium übergegangen. Die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in den USA unterliegt dem „Nuclear Waste Policy“ Gesetz von 1982 in der geänderten Fassung von 1987. Dieses Gesetz legt die Notwendigkeit für ein tiefeingeologisches Endlager für kommerziell abgebrannte Brennelementen und hochradioaktive Abfälle aus dem Atomwaffenprogramm fest. Das Gesetz verlangt, dass die NRC einen Endlagerstandort genehmigt, der durch dem Energieministerium ausgewählt und betrieben wird, und zwar auf der Grundlage der US-Umweltschutzbehörde (EPA – Environmental Protection Agency) entwickelten Standards. Das Atommüllgesetz hat einen „Standardvertrag“ festgelegt, gemäß dem Genehmigungsnehmer so lange Eigentümer der abgebrannten Brennelemente sind, bis das Energieministerium das Eigentumsrecht beansprucht, wenn diese Abfälle von den Anlagen zu einem Endlager verbracht werden sollen. Momentan verbleiben abgebrannte Brennelemente an den Reaktorstandorten, mit Ausnahme von geringen Mengen an abgebrannten Brennelementen, die zu Reaktoren, die sich im Besitz von Versorgungsunternehmen befinden, oder zu einem Zentrallager im Besitz der Versorgungsunternehmen (dem Lager Morris in Illinois) transportiert wurden.

In den Ergänzungen zum Atommüllgesetz hat der US-Kongress Yucca Mountain, Nevada, als einzigen Standort ausgewählt, um dessen Eignung für ein tiefeingeologisches Endlager zu bewerten. Das Energieministerium hat einen Genehmigungsantrag zum Bau eines Endlagers an die NRC im Jahre 2008 eingereicht, aber die Administration von Präsident Obama hat den Genehmigungsantrag im Jahre 2009 zurückgezogen und die Behörde für das Management von Zivilen Radioaktiven Abfällen (Office of Civilian Radioactive Waste Management) im Energieministerium aufgelöst und stattdessen die Blue Ribbon Commission zur Nuklearen Zukunft der USA eingerichtet, um eine neue Strategie für die Probleme am Ende der nuklearen Brennstoffkette festzulegen. Die Blue Ribbon Commission hat ihren Bericht im Jahre 2012 erstellt, der nachdrücklich die dringende Notwendigkeit für ein tiefeingeologisches Endlager zeigt und drängt, dass Standortauswahlverfahren zustimmungsorientiert durchgeführt werden muss.⁴³⁷ Obwohl das Atommüllgesetz noch immer das Gesetz der USA ist, ist der Kongress momentan gespalten in Bezug auf das Schicksal von Yucca Mountain.

Das Wirtsgestein in dem Endlager Yucca Mountain ist vulkanischer Tuff (verdichtete Asche) in einem seismisch und vulkanisch aktiven Gebiet. Der Endlagerbereich würde sich oberhalb des Grundwasserspiegels in einer geochemisch-oxidierenden Umgebung befinden, im Gegensatz zu den Endlagerprogrammen anderer Länder. Der Standort selbst wurde durch das Energieministerium, zusammen mit drei weiteren Standorten, einschließlich der Basaltvorkommen Columbia River in der Nähe des Standorts Hanford in Richland, Washington und der Salzstöcke im nördlichen Texas, ausgewählt. Das ursprüngliche Atommüllgesetz hat die gleichzeitige Klassifizierung von drei Standorten gefordert, aber bei der Ergänzung des Gesetzes hat sich der Kongress ausschließlich auf Yucca Mountain konzentriert. Der Bundesstaat Nevada hat sich seit der Verabschiedung der Ergänzungen zu dem Gesetz im Jahre 1987 konsequent gegen den Standort gewehrt und diese Ergänzungen als „Screw Nevada“ Gesetz bezeichnet. An den Atomkraftwerken werden die abgebrannten Brennelemente entweder in den Reaktorabklingbecken, wobei fast alle dieser Lagerbecken mit zusätzlichen Regalen ausgestattet wurden, um das Lagervolumen auf fast das Vierfache der ursprünglichen Größe zu erhöhen, oder in Trockenlagern gelagert.⁴³⁸ In vielen Atomkraftwerken sind die Lagerbecken für abgebrannte Brennelemente fast voll. Aufgrund dessen haben 56 von den 59 Atomkraftwerken in den USA irgendeine Art von Trockenlager

⁴³⁷ Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, „Report to the Secretary of Energy“, Januar 2012, op. cit.

⁴³⁸ Robert Alvarez, Jan Beyea et al., „Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor, Fuel in the United States“, *Science and Global Security*, 11(1), 22 Januar 2003, S. 1-51.

vor Ort.⁴³⁹ Einige Atomkraftwerke verfügen nicht über die Möglichkeit, einen vollständigen Reaktorkern zu entladen, und es gibt keine dementsprechende zwingende Vorschrift. Außerdem gibt es keine Vorschriften, die die Berichterstattung über die Mengen von abgebrannten Brennelementen oder die Art und Weise des Managements dieser abgebrannten Brennelemente in den Lagerbecken vorschreiben. Es ist deshalb unbekannt, ob Atomkraftwerke vor kurzem entladene Brennelemente in das Lagerbecken verteilt oder ob sie diese an einem einzigen Ort innerhalb des Lagerbeckens eingelagert haben, und es gibt keine offiziellen Regierungsangaben zu den Mengen von abgebrannten Brennelementen an den Reaktorstandorten.

Kürzlich hat die NRC zwei Genehmigungsanträge zum Bau von zentralen Zwischenlagern für abgebrannte Brennelemente erhalten, einen von Holtec International im Südosten von New Mexico in der Nähe der WIPP-Anlage und die andere von Waste Control Specialists in der Nähe des Lagers für schwachradioaktive Abfälle in Andrews, Texas. Die NRC hat ein zentrales Zwischenlager in der Nähe von Salt Lake City (Utah) im Jahre 2006 genehmigt, aber der Bundesstaat und das US-amerikanische Innenministerium haben verhindert, dass es jemals in Betrieb geht.⁴⁴⁰

In den USA existiert das einzige weltweit in Betrieb befindliche tiefe geologische Endlager: das Waste Isolation Pilot Project (WIPP). Dieses befindet sich in einer Tiefe von 600 m in einem Salzstock; in diesem Lager werden transuranische Abfälle aus dem Atomwaffenkomplex in der Nähe von Carlsbad, New Mexico gelagert. Die WIPP-Anlage wurde durch die Kommune vor Ort in den 1970er Jahren gutgeheißen, und der Standort begann im Jahre 1999 mit der Annahme von Abfällen. Der Standort erfreut sich einer starken Unterstützung vonseiten der örtlichen Kommune, die Verbesserungen bei ihren Schulen und viele andere positive Entwicklungen genießt, als Folge der Ansiedlung vieler Angestellter des DOE in dem Außenbüro in Carlsbad. Selbst nach einem Unfall im Jahre 2014, bei dem Radioaktivität freigesetzt wurde und nach dem die Anlage für mehr als zwei Jahre geschlossen war, unterstützt die Gemeinde dieses Projekt weiterhin.

Der Umgang mit schwachradioaktiven Abfällen in den USA wird durch das Gesetz über Schwachradioaktive Abfälle von 1980 in der ergänzten Fassung von 1985 geregelt. Dieses Gesetz legt fest, dass die Bundesstaaten die Endlagerung ihrer schwachradioaktiven Abfälle handhaben und kontrollieren müssen; allerdings ist es ihnen erlaubt, „Zusammenschlüsse“ mit anderen Bundesstaaten herbeizuführen. Diese Zusammenschlüsse würden einen Standort in einem der Bundesstaaten in dem Zusammenschluss auswählen, um ein Endlager zu beherbergen. Es wurden zehn Zusammenschlüsse gebildet, obwohl es zehn Bundesstaaten gibt, die keinem dieser Zusammenschlüsse angehören. Nur drei Zusammenschlüsse waren dabei erfolgreich, neue Endlager für schwachradioaktive Abfälle einzurichten.

⁴³⁹ U.S.NRC, „U.S. Independent Spent Fuel Storage Installations (ISFSI)“, Nuclear Regulatory Commission, März 2019, <https://www.nrc.gov/docs/ML1907/ML19071A163.pdf>, Stand 9. Mai 2019.

⁴⁴⁰ World Nuclear News, „Cancellation leaves no options for US waste“, 4. Januar 2013, <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Cancellation-leaves-no-options-for-US-waste>, Stand 9. Mai 2019.

Vier Endlager für schwachradioaktive Abfälle in den USA wurden geschlossen:

- die Anlage Maxey Flats in Kentucky, die von 1963–1977 in Betrieb war und sich im Besitz von NECO (später US Ecology) befand, und bei der eine umfangreiche Kontamination von Böden, Oberflächen- und Grundwasser auftrat;
- die Anlage Sheffield in Illinois war von 1967–1978 in Betrieb und befand sich auch im Besitz von NECO;
- die Anlage West Valley (New York) wurde im Jahre 1975 geschlossen;
- die Anlage Beatty in Nevada war von 1962–1993 in Betrieb und befand sich im Besitz von US Ecology.

Es befinden sich zum jetzigen Zeitpunkt vier Endlager für schwachradioaktive Abfälle in Betrieb. Zwei von ihnen, die Anlage Barnwell, in South Carolina, die von der Firma Energy Solutions betrieben wird, und die Anlage Richland, in Washington, die durch die Firma US Ecology betrieben wird, nehmen nur Abfälle aus ihren Zusammenschlüssen an. Die Anlage Clive in Utah, die sich im Besitz von Energy Solutions befindet, nimmt Abfälle von allen Bundesstaaten an, und die Anlage von Waste Control Solutions in Andrews, Texas nimmt Abfälle außerhalb ihres Zusammenschlusses mit einer vorherigen Vereinbarung an.

KOSTEN UND FINANZIERUNG

Die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen wird durch den Nuclear Waste Fund (NWF) unterstützt, der durch das Atommüllgesetz von 1982 eingerichtet wurde. Diese Gelder sind ausschließlich für die Entwicklung eines tiefeingeologischen Endlagers für hochradioaktive Abfälle bestimmt. Der Fonds erhob bis 2014 Gebühren von Steuerzahlern der Stromversorgungsbranche in Höhe von US\$ 1/MWh (ca. € 0,7/MWh), und das Management erfolgt durch den Kongress. Der Fonds hat bis September 2018 US\$ 39,2 Milliarden (€₂₀₁₈ 30,1 Milliarden) angesammelt.

Obwohl der Fonds darauf ausgelegt war, als Treuhandkonto zu fungieren, hat der Kongress stattdessen die Finanzmittel dazu benutzt, US-amerikanische Schulden zu tilgen. Die in dem Fonds eingesammelten Gelder werden wie eine Steuerrückzahlung behandelt, wohingegen die aus dem Fonds zugewiesenen Gelder Ausgabenbeschränkungen unterliegen. Als Resultat hat der Kongress Schwierigkeiten, Mittel bei Bedarf zuzuwenden. Es werden aufgrund eines Bundesverfahrens gegen das Energieministerium (DOE – Department of Energy) im Jahre 2013 nicht länger Gelder in dem Fonds eingesammelt, weil die Behörde nicht genügend Fortschritte bei der Entfernung von Brennelementen aus den Atomkraftwerken gemacht hat.⁴⁴¹ Die Kostenschätzungen des DOE in Bezug auf die Endlagerung von US-amerikanischen hochradioaktiven Abfällen in dem Endlager in Yucca Mountain beliefen sich auf US\$ 96 Milliarden im Jahre 2008 (€₂₀₀₈ 61,5 Milliarden).⁴⁴² Das Energieministerium hat bereits ungefähr US\$ 15 Milliarden (€ 13,1 Milliarden) für den Ausbau von Yucca Mountain ausgegeben.

⁴⁴¹ Sally M. Benson, Rod Ewing et al., „Reset of America’s Nuclear Waste Management—Strategy and Policy“, Center for International Security and Cooperation, Stanford University; Elliot School of International Affairs, George Washington University, 15. Oktober 2018, https://fsi-live.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/reset_report_2018_final.pdf, Stand 9. Mai 2019.

⁴⁴² U.S. DOE, „U.S. Department of Energy Releases Revised Total System Life Cycle Cost Estimate and Fee Adequacy Report for Yucca Mountain Project“, 5 August 2008, <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-releases-revised-total-system-life-cycle-cost-estimate-and-fee>, Stand 9. Mai 2019.

Das Finanzierungssystem bei den Atomkraftwerken in den USA ist aufgrund des in dem Atommüllgesetz enthaltenen „Standardvertrages“ komplizierter. Das Gesetz verlangt vom DOE, mit der Übernahme der Rechtstitel an den abgebrannten Brennelementen an den Reaktorstandorten zum 31. Januar 1998 zu beginnen, und diese Brennelemente in ein tiefengeologisches Endlager zu verbringen. Natürlich geschah dies nicht, und der Vertrag wurde verletzt. US-amerikanische Gerichte haben Entscheidungen zugunsten von Genehmigungsinhabern von Atomkraftwerken gefällt, denen jetzt Entschädigungen gezahlt werden. Das US-amerikanische Justizministerium verwaltet einen „Judgment Fund“ mit Steuergeldern in Höhe von ungefähr US\$ 2 Millionen (€₂₀₁₉ 1,8 Millionen) pro Tag, und zwar in Bezug auf alle Atomkraftwerke, die die Regierung auf Entschädigung verklagt haben.⁴⁴³

Alle Genehmigungsinhaber für Atomkraftwerke müssen nachweisen, dass sie über ausreichende Finanzmittel verfügen, um ihre Reaktoren stillzulegen, wenn diese letztendlich abgeschaltet sind. Die meisten Atomkraftwerke bilden die erforderlichen Rücklagen in Bezug auf die Betriebsdauer ihrer Atomkraftwerke. Sie erstellen alle zwei Jahre einen Bericht über den Betrag ihrer Stilllegungsfonds an die NRC; diese verwendet einen Algorithmus, um zu bestimmen, ob sie ausreichende Mittel zurückstellen. Die Finanzmittel für die Stilllegung dürfen nicht für Ausgaben des Managements von abgebrannten Brennelementen verwendet werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die USA stehen noch mehr als andere Atomstaaten vor einer der größten Herausforderungen in Bezug auf das Management ihrer radioaktiven Abfällen. Es existieren nicht nur große Mengen an Abfällen aus dem kommerziellen Sektor, sondern auch der Atomwaffenkomplex hat erschreckend große Mengen an Abfällen produziert, deren Management extrem schwierig ist. Das Management und die Endlagerung aller dieser Abfälle wird viele Jahrzehnte dauern und Hunderte von Milliarden Dollar kosten. Die USA haben das Problem der Handhabung von schwachradioaktiven Abfällen weitgehend gelöst; das Land kämpft aber noch mit dem Umgang mit mittel- und hochradioaktiven Abfällen. Es zeichnet sich keine klare Lösung in der nahen Zukunft ab.

⁴⁴³ Jeremy Dillon, „Perry: ‚We have to find a solution‘“, *Energywire*, 27. März 2019, <https://www.eenews.net/energywire/stories/1060130031>, Stand 9. Mai 2019.



8. LISTE DER ABKÜRZUNGEN

ABKÜRZUNG ABFALLART

VLLW	very low-level waste – Sehr schwachradioaktive Abfälle
VSLW	very short-lived waste – Sehr kurzlebige Abfälle
LLW	low-level waste – Schwachradioaktive Abfälle
LLW-LL	low-level waste, long lived – Schwachradioaktive, langlebige Abfälle
LLW-SL	low-level waste, short lived – Schwachradioaktive, kurzlebige Abfälle
LILW	low- and intermediate-level waste – Schwach- und mittelradioaktive Abfälle
LILW-LL	low- and intermediate-level waste, long lived Schwach- und mittelradioaktive Abfälle, langlebig
LILW-SL	low- and intermediate- level waste, short lived Schwach- und mittelradioaktive Abfälle, kurzlebige
ILW	intermediate-level waste – Mittelradioaktive Abfälle
ILW-LL	intermediate-level waste, long lived – Mittelradioaktive Abfälle, langlebig
ILW-SL	intermediate-level waste, short lived – Mittelradioaktive Abfälle, kurzlebige
HLW	high level waste – Hochradioaktive Abfälle

ABK. BEDEUTUNG AUF DEUTSCH (UND ORIGINALSPRACHE, FALLS ZUTREFFEND)

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor – Fortgeschrittener Siedewasserreaktor
AEC	Atomic Energy Commission – US-Atomenergiekommission
AGR	Advanced Gas Cooled Reactor – Fortgeschrittener Gasgekühlter Reaktor
AKEND	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (des Bundesumweltministerium, Deutschland)
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs Französische Nationalbehörde für Nuklearabfall-Management
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire – Französische Behörde für Atomsicherheit
ATA	Alphatoxische Abfälle
ATG	Atomenergiegesetz (Deutschland)
BEIS	Department for Business, Energy and Industrial Strategy Britisches Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriestrategie
BFE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (Deutschland) [seit Januar 2020: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)]
BFS	Bundesamt für Strahlenschutz (Deutschland)
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung (Deutschland)
BGZ	Gesellschaft für Zwischenlagerung (Deutschland)

BRC	„Below Regulatory Control“ (US-amerikanische Begriff für den IAEA-Begriff „Exempt“) Unterhalb der Aufsichtskontrolle
BWR	Boiling Water Reactor – Siedewasserreaktor
BZL	Bundeszzwischenlager – Paul Scherer Institut (Schweiz)
CCSE	La Cassa conguaglio per il settore elettrico Italienisches Entschädigungsfonds für den Stromsektor [seit 2015: Cassa per i servizi energetici e ambientali (CSEA)]
CDD	Commission du Développement Durable et de l'aménagement du territoire Kommission der Nationalversammlung im Französischen Parlament für Nachhaltige Entwicklung und Regionalplanung
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives Französische Kommission für Atomenergie und Alternative Energien
CIRES	Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage Industrieanlage zur Zusammenführung, Zwischen- und Endlagerung von radioaktiven Abfällen – in Morvilliers (Frankreich)
CLAB	Zentrales Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente – an dem AKW-Oskarshamn (Schweden)
CNEF	Commission nationale d'évaluation du financement des charges de démantèlement des installations nucléaires de base et de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs) Französische Nationale Kommission für die Bewertung der Finanzierung der Gebühren für die Stilllegung von Atomanlagen und das Management von Abgebrannten Brennelementen und Radioaktiven Abfällen
CORWM	Committee on Radioactive Waste Management Britischer Ausschuss für das Management radioaktiver Abfälle
COFIL	Comité de Pilotage Stocamine – Leitungsgremium von Stocamine (Frankreich)
CSA	Centre de stockage de l'Aube – Endlager in Soulaines-Dhuys (Frankreich)
CSM	Centre de stockage de la Manche – Endlager in La Hague (Frankreich)
CTS	Centralized Temporary Storage – Zentrales Zwischenlager
DDREF	Dose and Dose-rate effectiveness factor – Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor
DEFRA	Department for Environment, Food & Rural Affairs Britisches Ministerium für Umwelt, Ernährung und Angelegenheiten des ländlichen Raums
DGD	Deep Geological Disposal – Tiefengeologische Endlagerung
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsvorschung (Deutschland)
DOE	Department of Energy – US-Amerikanisches Energieministerium
EAR	Excess Absolute Risk
EDF	Électricité de France – Nationale Französische Stromgesellschaft
EDF ENERGY	Britische Tochtergesellschaft des französischen Unternehmens EDF
EIA	US Energy Information Administration US-Amerikanische Informationsverwaltung zur Energie

EKRA	Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (Schweiz)
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (Schweiz)
EPA	Environmental Protection Agency – Umweltschutz Behörde (USA)
EPR	European Pressurized water Reactor – Europäischer Druckwasserreaktor
EPRI	Electric Power Research Institute Forschungs-Institut zur elektrischen Energieversorgung (USA)
ERR	Excess Relative Risk
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
FA	Fuel Assembly – Brennelement
FBR	Fast Breeder Reactor – Schnell-Brüter-Reaktor
GCR	Gas-Cooled Reactor – Gasgekühlter Reaktor
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service (Deutschland)
GW	Gigawatt (Installierte Leistung)
GWH	Gigawattstunden (Stromerzeugung)
HAL	Highly Active Liquor – Hochradioaktive Flüssigkeit, bezieht sich auf Salpetersäure
IAEA	International Atomic Energy Agency – Internationale Atomenergie-Organisation
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement Französische Umweltschutzbehörde
ICRP	International Commission on Radiological Protection Internationale Strahlenschutzkommission
ISDC	International Structure for Decommissioning Costing Internationale Struktur für die Kostenermittlung der Stilllegung
KBS	Kärnbränslesäkerhet – Schwedisches Endlagerungskonzept „Sicherheit von Kernbrennstoffen“
KEG	Kernenergiegesetz, Schweiz
KFK	Kommission zur Überprüfung der Finanzierung des Kernenergieausstiegs (Deutschland)
LLWR	Low-level waste repository – Endlager für schwachradioaktive Abfälle
LWR	Light-water reactor – Leichtwasserreaktor
MIF	Medizin, Industrie und Forschung
MIRAM	Schweizer Modellhaftes Inventar für Radioaktive Materialien
MOX	Mischoxid [Brennelemente]
MW	Megawatt (Installierte Leistung)
MWH	Megawattstunden
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NAO	National Audit Office – Britischer Bundesrechnungshof
NAS	US National Academy of Sciences – US-Amerikanische Akademie der Wissenschaften
NBG	National Begleitgremium (Deutschland)

NDA	Nuclear Decommissioning Authority Britische Behörde für die Stilllegung von Atomanlagen
NEA	Nuclear Energy Agency – Atomenergieagentur der OECD
NLF	Nuclear Liabilities Fund – Britischer Nuklearhaftungsfonds
NRC	Nuclear Regulatory Commission – US-Amerikanische Aufsichtsbehörde
NRWR	National Radioactive Waste Repository Nationale Endlager für Radioaktive Abfälle – in Bataapáti (Ungarn)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
ONDRAF/ NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies/ Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijtstoffen Belgische Bundesbehörde für radioaktive Abfälle und angereichertes spaltbares Material
ORNL	Oak Ridge National Laboratory Nationale Forschungseinrichtung in Oak Ridge, Tennessee (USA)
PBOS	Parent Body Organisation – Dachorganisationen
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor – Schwerwasser-Druckreaktor
PIMCU	Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union – Aktiengesellschaft (Russland)
PNGMDR	Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs Französischer Nationalplan für das Management Radioaktiver Materialien und Abfälle
PSI	Paul Scherer Institut (Schweiz)
PURAM	Public Agency for Radioactive Waste Management [seit 2008: Public Limited Company for Radioactive Waste Management] Aktiengesellschaft für das Management von Radioaktiven Abfällen Ungarns
PWR	Pressurized Water Reactor – Druckwasserreaktor
RAWRA	Radioactive Waste Repository Authority Tschechische Endlagerbehörde für Radioaktive Abfälle
RBMK	Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyi – Gasgekühlter Leichtwasser-Reaktor
REU	Reprocessed Enriched Uranium – Wiederaufgearbeitetes angereichertes Uran
RWDTF	Anlage zur Behandlung und Lagerung von Radioaktiven Abfällen Radioactive Waste Treatment and Disposal Facility
SFISF	Spent Fuel Interim Storage Facility – Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente
SFL	Slutförvar för långlivat [radioaktivt avfall] Schwedisches tiefengeologisches Endlager für langlebige radioaktive Abfälle
SFR	Slutförvar för [kortlivat] radioaktivt [avfall] Schwedisches tiefengeologisches Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle
SKB	Svensk Kärnbränslehantering – Schwedische Gesellschaft für das Management von Brennelementen und radioaktiven Abfällen
SNF	Spent Nuclear Fuel – Abgebrannte Brennelemente
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten – Schwedische Strahlenschutzbehörde

STANDAG	Standortauswahlgesetz (Deutschland)
STENFO	Stilllegungs- und Entsorgungsfonds Stilllegungsfonds für Kernanlagen und Entsorgungsfonds für Kernkraftwerke (Schweiz)
SVAFO	Schwedische Gesellschaft für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
T HM	Tonnen Schwermetall
THORP	Thermaloxid-Wiederaufarbeitungsanlage
UDSSR	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
UNGG	Natürlicher Uran-Graphit-Gas-Reaktor (Uranium Naturel Graphite Gaz)
UVEK	Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Schweiz)
VVER	Vodo-Vodyanoi Energeticheskoy Reaktor – Wasser/Wasser Atomreaktor aus Russland
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant US-Amerikanischer Abfallbeseitigung-Pilotanlage, in New Mexico
WLM	Working Level Month
WNWR	World Nuclear Waste Report
ZLN	Zwischenlager Nord, in Rubenow – außerhalb des ehem. AKW Greiswald-Lubmin (Deutschland)
ZWIBEZ	Zwischenlager Beznau (Schweiz)
ZWILAG	Zwischenlager, in Würenlingen (Schweiz)
ZZL	Zentrales Zwischenlager, in Würenlingen (Schweiz)



9. MITWIRKENDE

MANON BESNARD ist Atomingenieurin der Ecole Nationale Supérieure de l'Énergie, l'Eau et l'Environnement (ENSE3) am Institut National Polytechnique de Grenoble. Von 2014–2020 war sie als Nuklear- und Energieexpertin bei WISE-Paris tätig, einer französischen Non-Profit Beratungsagentur. Seit 2020 ist sie Mitglied der Abteilung für „nukleare und fossile Brennstoffe“ am Institut négaWatt. Ihr Schwerpunkt sind Fragen der Nuklearsicherheit und des Managements von radioaktiven Abfällen. Sie ist Mitglied ständiger Beratungsgremien der französischen Atomsicherheitsbehörde.

MARCOS BUSER, geb. 1949, Geologe und Sozialwissenschaftler, ist seit über 40 Jahren auf dem Gebiet der Kernenergie und der Entsorgung chemotoxischer Sonderabfälle tätig. Er betreut große Abfallprojekte in der Schweiz, wie auch in den Nachbarländern, und arbeitet eng mit Universitäten, Forschungsinstituten, internationalen Institutionen, Regierungsbehörden und privaten Ingenieurbüros zusammen. Marcos Buser war oder ist Vorsitzender/Mitglied von Expertenkommissionen, wie die EKRA-Expertenkommission für das Schweizer Endlagerkonzept (1999–2002), die Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit (2008–2012) oder mehrere Experten-Kommissionen im Bereich der Sanierung von Industrie-Deponien. Er war Präsident der Überwachungs- und Begleitkommission des internationalen Forschungslabor Mont Terri für hochradioaktive Abfälle (2000–2013/2014) und ist an Projekten im Bereich der unterirdischen Lagerung/Entsorgung von gefährlichen chemisch-toxischen Abfälle in ehemaligen Bergwerken beteiligt.

IAN FAIRLIE ist unabhängiger Berater für Strahlung und Umwelt mit Abschlüssen in Chemie und Strahlenbiologie. Sein Promotionsstudium am Imperial College in London und an der Princeton University in den USA befasste sich mit den gesundheitlichen Auswirkungen der Technologien in Bezug auf nukleare Abfälle. Dr. Fairlie war wissenschaftlicher Sekretär des Ausschusses der Britischen Regierung zur Untersuchung der Strahlenrisiken von Internen Strahlern (www.cerrie.org). Dr. Fairlie ist weiterhin als Berater für die IPPNW, Umwelt-NGOs und lokale Verwaltungen in verschiedenen Ländern tätig.

ALLISON M. MACFARLANE ist Professorin für Politische Wissenschaften und Internationale Angelegenheiten an der George Washington University, Direktorin des Institute for International Science and Technology Policy an der Elliott School of International Affairs der Universität. Dr. Macfarlane war von Juli 2012 bis Dezember 2014 Vorsitzende der US-amerikanischen Nuclear Regulatory Commission (NRC). Dr. Macfarlane besitzt einen Dokortitel in Geologie des Massachusetts Institute of Technology und ein BSc-Diplom in Geologie der University of Rochester. Sie erhielt Stipendien am Radcliffe College und an den Universitäten MIT, Stanford und Harvard. Sie gehörte zum Professorenkollegium an der Georgia Tech und der George Mason University. Von 2010 bis 2012 war sie Mitglied der Blue Ribbon Commission zur Nuklearen Zukunft der USA, die von der Obama-Administration eingesetzt wurde, um eine nationale Strategie für die hochradioaktiven Abfälle der Nation zu entwickeln.

GORDON MACKERRON ist Direktor der Wissenschafts- und Technologiepolitik-Forschung an der University of Sussex. Er arbeitete seit April 2005 als Direktor der Sussex Energy Group, SPRU (Science Policy Research Unit), University of Sussex, nach vier Jahren als Stellvertretender Direktor, bei NERA Economic Consulting, London und einer früheren 20-jährigen beruflichen Laufbahn am SPRU. Er ist Wirtschaftswissenschaftler mit Diplomen der Universitäten von Cambridge und Sussex. Seine akademische Laufbahn befasste sich mit Fragen der Ökonomie und Politik der Stromversorgung, insbesondere auf dem Gebiet der Atomkraft mit häufigen Veröffentlichungen und Radiosendungen.

YVES MARIGNAC ist seit 2020 Leiter der Abteilung für „nukleare und fossile Brennstoffe“ am Institut négaWatt. Er war 17 Jahre Direktor der Agentur WISE-Paris (World Information Service on Energy), der er 1996 nach seiner Graduierung in 'Science Information' an der Orsay/Paris-Sud Universität beigetreten war. Er arbeitete als Experte und Berater für viele nationale und internationale Organisationen, Akademien, Parlamentsfraktionen, NGOs und Medien und erstellte zahlreiche Berichte zu Energiestrategien und zur Atomenergie. Er koordinierte von 2006 bis 2013 die Groupe d'expertise pluraliste sur les mines d'uranium (GEP-Mines). Er ist Mitglied des durch die Princeton University unterstützten International Panel of Fissile Materials (IPFM) und Mitglied der Ständigen Beratenden Expertengruppe des ASN zu Reaktoren (GPR), sonstigen Anlagen (GPU) und druckbelasteten Bauteilen (GPESPN).

ESZTER MATYAS graduierte in Politikwissenschaften an der Central European University und der Eötvös Loránd University (ELTE), wo sie hauptsächlich auf dem Gebiet der Forschung im Bereich Umweltpolitik tätig war. Sie hat ihr PhD-Programm in Umweltwissenschaften an der Central European University im September 2019 begonnen. Ihr Interesse an Atomenergie führte sie zum Energiaklub, wo sie die Aufgaben des nuklearen Projektmanagements wahrnimmt. Sie hat Artikel zum aktuellen Zustand von Natur und Umwelt in illiberalen Demokratien und über den russischen Einfluss auf die Atomindustrie veröffentlicht. Sie moderiert, zusammen mit anderen Kolleginnen, eine Radioshow zu Umweltfragen. Sie ist Mitglied eines investigativen Journalistenteams, um die Probleme im Zusammenhang mit Nuklearanlagen in Ungarn aufzudecken.

EDVARD SEQUENS ist Vorsitzender des Umweltschutzvereins Calla, wo er außerdem als Energieberater arbeitet. Er besitzt einen Abschluss in Automatisierten Steuerungssystemen der Military Technical University in Liptovský Mikuláš. Er hat in der regierungsunabhängigen Expertenkommission für die Bewertung des Energiebedarfs der Tschechischen Republik und darüber hinaus als externer Berater des Umweltministeriums gearbeitet. Er ist Mitglied des Regierungsausschusses zu Nachhaltiger Energie. Er hat zu der Erstellung einer alternativen Roadmap zur Entwicklung der Energieindustrie in der Tschechischen Republik mit der Bezeichnung Smart Energy beigetragen.

JOHAN SWAHN ist Direktor des MKG, des schwedischen NGO-Büros für die Überprüfung von Radioaktiven Abfällen. Er leitet die Arbeit der Organisation zur Überprüfung des Genehmigungsantrags der Nuklearindustrie für ein tiefegeologisches Endlager für abgebrannte Brennelemente in Schweden. Er besitzt einen Master of Science in Physikalischer Technik und einen Dokortitel in Wissenschaft, Technologie und Globaler Sicherheit der Chalmers University of Technology, Göteborg. Seine Promotion und seine Zeit als Post-Doktorand konzentrierte sich auf Fragen der Nichtverbreitung von Atomwaffen und Fragen zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen und militärischen Spaltprodukten. Vor seiner jetzigen Position arbeitete er als Forscher und Dozent an der Chalmers University of Technology auf den Gebieten Energie, Umwelt und Globale Sicherheit.

BEN WEALER ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe für Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP) an der TU Berlin und Gastwissenschaftler am DIW Berlin (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung). Sein Forschungsgebiet ist die Ökonomie der Atomenergie, mit Schwerpunkt auf Stilllegung, Management radioaktiver Abfälle, den Neubau von Atomkraftwerken und Dual-Use Fragen. Er ist Gründungsmitglied eines Forschungsprojekts zu Kernenergie in Deutschland, in Europa und in Staaten außerhalb Europas, welches gemeinsam von der TU Berlin und dem DIW Berlin getragen wird; er ist außerdem – zusammen mit Anderen – Autor des ersten deutschen unabhängigen Rückbau-Monitors und seit 2018 ein Mitverfasser des World Nuclear Industry Status Reports.

IMPRESSUM

Veröffentlicht unter der nachfolgenden Creative Commons License:

[HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-NC-ND/3.0](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0). Zuordnung – Sie müssen angemessene Urheber- und Rechteangaben machen, einen Link zur Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade Sie oder Ihre Nutzung besonders. Nicht kommerziell – Sie dürfen das Material nicht für kommerzielle Zwecke nutzen. Keine Bearbeitungen – Wenn Sie das Material remixen, verändern oder darauf anderweitig direkt aufbauen, dürfen Sie die bearbeitete Fassung des Materials nicht verbreiten.

THE WORLD NUCLEAR WASTE REPORT – FOCUS EUROPE

November 2019

MITWIRKENDE: Manon Besnard, Marcos Buser, Ian Fairlie, Gordon MacKerron, Allison Macfarlane, Eszter Matyas, Yves Marignac, Edvard Sequens, Johan Swahn und Ben Wealer.

REDAKTIONSLEITER DER ENGLISCHEN AUSGABE: Arne Jungjohann

PROJEKTTEAM: Rebecca Harms, Mycle Schneider, Gordon MacKerron, Wolfgang Neumann, Anna Turmann und Arne Jungjohann.

PARTNER UND SPONSOREN: Altner-Combecher Stiftung, Bäuerliche Notgemeinschaft Trebel, Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND), Bürgerinitiative Umweltschutz Lüchow-Dannenberg e.V., Climate Core und Die Grünen/EFA MEPs Group im Europaparlament, die Heinrich-Böll-Stiftung (HBS) und deren Büros in Berlin, Brüssel, Paris, Prag und Washington DC, KLAR! Schweiz, Annette und Wolf Römmig und die Swiss Energy Foundation.

DEUTSCHE AUSGABE: DER WELT-ATOMMÜLL-BERICHT 2019 – FOKUS EUROPA

September 2020

ÜBERSETZUNG: Heiko Jäger

KOORDINATION: Rebecca Harms

BEARBEITUNG DER DEUTSCHEN FASSUNG: Rebecca Harms, Ben Wealer, Nina Schneider und Mycle Schneider.

DESIGN: Agentur für Erneuerbare Energien, Andra Kradolfer

TITELFOTO: Sean Gallup/Getty Images News

Das Foto zeigt mit hochradioaktiven Abfällen aus der Stilllegung von Atomkraftwerken befüllte Castorbehälter am Zwischenlager Nord am 8. Juni 2011 in Lubmin, Deutschland.

DRUCK: Arnold Group, Großbeeren

Downloaden dieser Veröffentlichung unter **WWW.WORLDNUCLEARWASTEREPORT.ORG**

www.WorldNuclearWasteReport.org