

Data Documentation

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

2025

Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland – Eine Einführung in die rechtlichen und technischen Hintergründe sowie Bestandsanalyse

Alexander Wimmers, Christian von Hirschhausen, Fabian Präger, Claudia Kemfert, Josephine Hiepler, Claudia Humann, Pauline Kaiser, Andrea Lagoda, Theresa Lang, Leila Lubosch, Ruta Nonnenbroich, Henning Pahlke, Raphael Stiemke, Zoe Tercier

IMPRESSUM

DIW Berlin, 2025

Die Forschungsergebnisse des DIW Berlin entstehen auf Basis empirischer Daten. Mit der Schriftenreihe Data Documentation wird Transparenz zum Prozess der Datengewinnung und Datenaufbereitung, zum methodischen Vorgehen und zur technischen Umsetzung datenbezogener Forschung am DIW Berlin geschaffen. Das DIW Berlin unterstützt damit aktiv die Anerkennung von Forschungsdaten als wissenschaftlichen Output und betrachtet zitierbar zugänglich gemachte Forschungsdaten als wissenschaftliche Veröffentlichung.

Zur Veröffentlichung in der Reihe der Data Documentation eingereicht werden können: Codebücher, Methodenberichte, Instrumente, Datendokumentationen und technische Dokumentationen. Data Dokumentationen können eingereicht werden von: DIW-MitarbeiterInnen, DIW-Forschungsdirektor*innen, DIW-Research Affiliates sowie Gastwissenschaftler*innen und assoziierten Wissenschaftler*innen.

DIW Berlin
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
Mohrenstr. 58
10117 Berlin
Tel. +49 (30) 897 89-0
Fax +49 (30) 897 89-200
www.diw.de

ISSN 1861-1532

Die einzelnen Ausgaben können kostenlos von der Website des DIW Berlin heruntergeladen werden:

<https://www.diw.de/datadocumentation>

Data Documentation des DIW Berlin sind in RePEc und Econstor indexiert:

<https://ideas.repec.org/s/diw/diwdde.html>

<https://www.econstor.eu/handle/10419/56389>

Data Documentation 110

Alexander Wimmers^{1,2,3,4}, Christian von Hirschhausen^{1,2}, Fabian Präger², Claudia Kemfert¹, Josephine Hiepler², Claudia Humann², Pauline Kaiser², Andrea Lagoda², Theresa Lang², Leila Lubosch², Ruta Nonnenbroich², Henning Pahlke², Raphael Stiemke², Zoe Tercier²

Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland – Eine Einführung in die rechtlichen und technischen Hintergründe sowie Bestandsanalyse

Berlin, März 2025

1: DIW Berlin, Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt, Mohrenstraße 58, 10117 Berlin

2: Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik, TU Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

3: Kontaktperson: Alexander Wimmers, awimmers@diw.de, +49 (0)30-314-75837

4: Diese „Data Documentation“ wurde im Rahmen der an der TU Berlin durchgeführten Lehrveranstaltungen „Interdisziplinäre Herausforderungen der Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle“ und „Nachhaltigkeitswerkstatt“ erstellt. Sie gibt einen Überblick über die technischen und regulatorischen Hintergründe der Lagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland und eine Zusammenstellung der in den Zwischenlagern untergebrachten Abfälle. Sie dient als Nachschlagewerk u.a. für den erstellten Dokumentarfilm „Einfach mal zwischenlagern“ und als Referenz für zukünftige Publikationen in diesem Bereich.

https://dx.doi.org/10.18723/diw_ddc:2025-110

Abstract

Auch nach der Abschaltung der letzten kommerziellen Kernkraftwerke in Deutschland ist die Atomwende noch nicht abgeschlossen: Nach der Abschaltung folgt der Rückbau der Kernkraftwerke und die Herausforderungen der sicheren Entsorgung der nuklearen Abfälle müssen bewältigt werden. Mit der de-facto Verzögerung der Standortauswahl für ein tiefeingeologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts rückt die Zwischenlagerung dieser Abfälle in den Fokus. Heute lagern die meisten hochradioaktiven Abfälle in den 16 dezentralen Zwischenlagern, zumeist an den Standorten der ehemaligen Kernkraftwerke und erste Betriebsgenehmigungen laufen in den kommenden zehn Jahren aus. Dies resultiert in ungeklärten Fragen zur sicheren Langzeitzwischenlagerung der radioaktiven Abfälle in Deutschland. Diese Data Documentation stellt eine umfassende Einführung in die Terminologie der nuklearen Entsorgung und einen Überblick über die aktuellen Bestände (schwach-, mittel- und hochradioaktive Abfälle) in deutschen Zwischenlagern dar. Dabei werden an einzelnen Standorten die Diskrepanzen zwischen den zur Verfügung gestellten Daten der verschiedenen Akteure herausgearbeitet und wesentliche Herausforderungen, insb. hinsichtlich der anstehenden Neugenehmigungen, thematisiert. Weiterhin dient diese Data Documentation als Nachschlagewerk für den als Studienprojekt veröffentlichten Film „Einfach mal (zwischen)lagern“ (siehe <https://www.youtube.com/watch?v=GWjAWtBdxOg>).

Even after the closure of the last commercial nuclear power plants in Germany, substantial challenges of the nuclear legacy remain. Nuclear power plants must be decommissioned, and remaining nuclear waste must be stored safely for the coming millenia. With the de facto delay in the selection of a site for a deep geological repository for high-level radioactive waste in Germany until the second half of this century, the German legislators' focus is shifting towards a so-called long-term interim storage facilities of this waste. Today, most of the high-level radioactive waste is stored at the 16 decentralized interim storage facilities, mostly located at the sites of former nuclear power plants. The first operating licenses will expire within the next ten years. This results in unresolved questions about the safe long-term interim storage of radioactive waste in Germany. This data documentation provides a comprehensive introduction to the terminology of nuclear waste disposal and an overview of the current stocks in German interim storage facilities, including low-, intermediate, and high-level wastes. It highlights the discrepancies between the data provided by the various stakeholders at individual sites and discusses key challenges, particularly with regard to pending new licenses. Furthermore, this data documentation serves as a reference work for the film "Einfach mal (zwischen)lagern" (see <https://www.youtube.com/watch?v=GWjAWtBdxOg>), which was published as a study project.

Keywords: Radioaktive Abfälle; Zwischenlager; Zwischenlagerung; Deutschland; Brennelementelagerung; CASTOR; // Nuclear waste management; interim waste storage; Germany; spent fuel; CASTOR

Vorwort

Im zur Abschaltung des Kernkraftwerks Grafenrheinfeld erschienen DIW Wochenbericht 22/2015 wurden die nach der endgültigen Abschaltung aller deutschen Kernkraftwerke anstehenden Herausforderungen des Rückbaus sowie der Entsorgung der radioaktiven Abfälle umfangreich thematisiert (Hirschhausen u. a. 2015). Im Wochenbericht herrschte ob der anstehenden Neuordnung des Standortauswahlverfahrens für die Identifizierung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ein vorsichtiger Optimismus, der sich 2021 im Wochenbericht 47/2021 als Teil der zu bewältigenden „Atomwende“ herauskristallisierte (Kendziorzski u. a. 2021; Präger, Brunnengräber, und von Hirschhausen 2023).

Während die Abschaltung der Kernkraftwerke in Deutschland im April 2023 vollzogen wurde, bestehen die oben angesprochenen Herausforderungen weiterhin. Der Rückbau der stillgelegten Kernkraftwerke schreitet voran, wobei Projektverzögerungen bereits heute absehbar sind. Dies gilt insbesondere für die ostdeutschen Kernkraftwerke der ehemaligen DDR. Die Herausforderungen des Rückbaus wurden in der DIW Data Documentation 104 ausführlich beleuchtet (Wimmers, Bärenbold, u. a. 2023) und in weiteren Veröffentlichungen tiefergehend analysiert (Hirschhausen und Wimmers 2023; Bärenbold u. a. 2024).

Die Neuordnung der Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wurde 2017 mit der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes abgeschlossen. Das Gesetz sieht eine Identifizierung des „bestmöglichen Standorts“ bis 2031 vor, sodass das Vorhaben der Endlagerung noch in diesem Jahrhundert abgeschlossen werden kann. 2022 veröffentlichte die zuständige Bundesgesellschaft für Endlagerung einen aktualisierten Zeitplan, der eine Standortauswahl für den Zeitraum zwischen 2046 und 2068 vorsah (BGE 2022). Ein weiteres Gutachten im Auftrag des zuständigen Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung, erschienen in 2024, geht sogar von 2074 aus (Krohn u. a. 2024). Damit würde sich der komplette Entsorgungsprozess bis weit in das 22. Jahrhundert verlagern.

Mit dieser Verzögerung gehen erhebliche neu zu diskutierende und die Öffentlichkeit betreffende Herausforderungen einher. Ein öffentliches Interesse ist jedoch nicht wahrzunehmen (Ott u. a. 2024)¹. Zu den wesentlichen Herausforderungen zählen auf der technischen Seite Fragestellungen rund um eine verlängerte Zwischenlagerung der hochradioaktiven Abfälle über genehmigte Behälterlebensdauern hinaus, sowie Fragen zur Materialprüfung und dem späteren Transport. Weiterhin stellt sich aus rechtlicher Sicht die Frage, ob eine Verschiebung überhaupt möglich ist und hinsichtlich der organisatorisch-gesellschaftlichen Perspektive müssen Unsicherheiten um Betroffenheit, Interesse, Finanzierung sowie Wissens- und Kompetenzerhalt bis in das 22. Jahrhundert adressiert werden (Hirschhausen und Wimmers 2023).

Mit dem Ziel der Kompetenzvermittlung führen die Autor*innen dieser Data Documentation als Teil des Dossiers Atomkraft in der Abteilung Energie, Verkehr und Umwelt² seit 2022 an der TU Berlin Lehrveranstaltungen zum Thema Atomenergie sowie den Herausforderungen der Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle durch und veröffentlichen zu den anstehenden Herausforderungen. Ergebnisse der Lehrveranstaltung

¹ Siehe auch den Kommentar von Christian von Hirschhausen, Konrad Ott und Klaus-Jürgen Röhlig im Wochenbericht 35/2024, https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.912115.de/24-35.pdf, (letzter Zugriff am 13.03.2025. Dieses Datum gilt für alle URLs, wenn nicht anders angegeben.)

² https://www.diw.de/de/diw_01.c.812540.de/dossier/dossier_atomkraft.html

„Nachhaltigkeitswerkstatt“, die seit 2022 transdisziplinäre Begleitprodukte für die Öffentlichkeit entwickelt, waren u.a. ein Fotoband, Quartette sowie ein Dokumentarfilm.³ Zu Letzterem soll diese Data Documentation als Begleit- und Nachschlagewerk dienen. Weiterhin soll diese Data Documentation in zukünftigen Veröffentlichungen des Autor*innen-Teams zum Thema der radioaktiven Entsorgung in Deutschland als Datenquelle und Referenz dienen. Die Inhalte wurden durch Studierende der TU Berlin zusammengetragen und durch das gesamte Autor*innen-Team konsolidiert und auf Richtigkeit geprüft.

Wir hoffen, durch diese Zusammenstellung der wesentlichen Begrifflichkeiten sowie der aktuellen Bestände in deutschen Zwischenlagern, einen Beitrag zum Kompetenzerhalt zu dem Themenbereich leisten können. Wesentlich ist dabei der öffentliche Zugang an zentralisierter Stelle sowie eine kritische Einordnung der aktuellen Situation und verstreuten Datenverfügbarkeit.

Im März 2025

Alexander Wimmers, Christian von Hirschhausen, Fabian Präger und Claudia Kemfert

³ Vgl. hierzu <https://www.oekom.de/buch/einfach-mal-abschalten-und-dann-9783987260308> sowie <https://www.youtube.com/watch?v=GWjAWtBdxOg>.

Inhaltsübersicht

Vorwort	ii
Inhaltsübersicht.....	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	2
2.1 Definitionen	2
3 Historische Aufarbeitung der Lagerung in Deutschland	12
4 Rechtlicher Hintergrund	15
5 Gesetzestexte zur Regulierung der Zwischenlagerung	15
6 Relevante Akteure	21
7 Finanzierung.....	23
8 Herausforderungen	25
9 Gesellschaftliche Herausforderungen.....	26
10 Organisatorische Herausforderungen.....	27
11 Technische Herausforderungen.....	28
12 Zwischenlager in Deutschland.....	30
13 Ausblick	48
14 Fazit.....	49
Literaturverzeichnis	51

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	ii
Inhaltsübersicht.....	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen	2
2.1 Definitionen	2
2.2 Radioaktiver Abfall.....	2
2.3 Zwischenlager	3
2.4 HAW	4
2.5 MAW/LAW	4
2.6 Kernbrennstoffe.....	5
2.7 Brennelemente	5
2.8 Nasslager	6
2.9 Trockenlager.....	6
2.10 Behälter für radioaktive Abfälle	7
2.10.1.1 CASTOR-Behälter	7
2.10.1.2 Ummantelte Betonabschirmung (UBA)	7
2.10.1.3 MOSAIK	8
2.10.1.4 Konrad-Container	8
2.11 Sicherheit.....	8
2.12 Sicherung	8
2.13 Heiße Zelle	9
2.14 Endlager	9
2.15 Konditionierung	10
2.16 Kritikalität und Kritikalitätssicherheit.....	11
2.17 Nachzerfallswärme.....	11
2.18 Wiederaufarbeitung.....	11
3 Historische Aufarbeitung der Lagerung in Deutschland	12
3.1 Die frühen Jahre und die Wiederaufarbeitung	12
3.2 Veränderungen der 2000er Jahre	14
3.3 Derzeitige Situation der Endlager-Standortsuche.....	14
4 Rechtlicher Hintergrund	15
5 Gesetzestexte zur Regulierung der Zwischenlagerung	15
5.1 Grundgesetz (GG).....	15
5.2 Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz (AtG))	15
5.3 Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung (BfKEG).....	16
5.4 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG).....	16
5.5 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV).....	16
5.6 Standortauswahlgesetz (StandAG).....	17

5.7	Verordnung über Anforderungen und Verfahren zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Atomrechtliche Entsorgungsverordnung (AtEV))	18
5.8	Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung (EntsorgNeuOG)	18
5.8.1.1	Entsorgungsfondsgesetz (EntsorgFondsG)	19
5.8.1.2	Entsorgungsübergangsgesetz (EntsorgÜG).....	20
5.8.1.3	Transparenzgesetz (TransparenzG)	20
5.8.1.4	Nachhaftungsgesetz (NachhG).....	20
6	Relevante Akteure	21
6.1	Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ).....	21
6.2	EWN-Gruppe	21
6.3	Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE).....	22
6.4	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV)	22
6.5	Landesbehörden	22
6.6	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)	22
6.7	Nationales Begleitgremium (NBG).....	23
7	Finanzierung	23
8	Herausforderungen	25
9	Gesellschaftliche Herausforderungen.....	26
10	Organisatorische Herausforderungen.....	27
11	Technische Herausforderungen.....	28
11.1	Abwärme	28
11.2	Strahlenschutz.....	29
11.3	Schutz vor Externa	29
12	Zwischenlager in Deutschland.....	30
12.1	Ahaus	33
12.2	Biblis	33
12.3	Brokdorf	34
12.4	Brunsbüttel	35
12.5	Gorleben	36
12.6	Grafenrheinfeld.....	37
12.7	Grohnde.....	37
12.8	Gundremmingen.....	38
12.9	Isar.....	38
12.10	Jülich	39
12.11	Krümmel	40
12.12	Lingen.....	40
12.13	Lubmin (Zwischenlager Nord)	41
12.14	Neckarwestheim	42
12.15	Obrigheim	42
12.16	Philippsburg.....	43
12.17	Stade	44
12.18	Unterweser	44
12.19	Würgassen	45
12.20	Landessammelstellen.....	45
12.21	Internationaler Vergleich	46

13 Ausblick	48
14 Fazit	49
Literaturverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausgewählte Radionuklide und deren Aktivität und Halbwertszeit (Darstellung nach Lersow 2018, 62)	5
Abbildung 2: Radiotoxizität von abgebrannten Brennelementen und Bestandteilen über die Zeit (eigene Darstellung nach Gompper et al. (2010, Abb. 1)).....	6
Abbildung 3: Größenvergleich der Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Abfälle (BGZ 2017)	7
Abbildung 4: Übersicht der AkteurInnen des nuklearen Rückbaus in Deutschland (Hirschhausen und Wimmers 2023, 290).....	21
Abbildung 5: Ausgabensätze im Finanzplan des BMUV für die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle (Wimmers, Göke, u. a. 2023, 30)	25
Abbildung 6: Änderung der Wärmeleistung von bestrahltem UO ₂ -Brennstoff (Pönitz 2017, 37)	29
Abbildung 7: Standorte der Brennelemente-Zwischenlager, Abfall-Zwischenlager und Landessammelstellen in der BRD (BMUV 2023, 20, Abb. 5.1).....	32

Abkürzungsverzeichnis

Grundlagen

BRD	Bundesrepublik Deutschland
Bq	Becquerel (Einheit der Aktivität), $Bq = 1/s$
DDR	Deutsche Demokratische Republik
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
HAW	hochradioaktive Abfälle
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
LAW/MAW	schwach- und mittelradioaktive Abfälle
SEWD	sonstige Einwirkungen Dritter
WAK	Pilot-Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe

Rechtlicher Hintergrund

AtEV	Verordnung über Anforderungen und Verfahren zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Atomrechtliche Entsorgungsverordnung)
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BfKEG	Gesetz zur Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGZ	Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung mbH
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
EntsorgFondsG	Entsorgungsfondsgesetz
EntsorgNeuOG	Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung
EntsorgÜG	Entsorgungsübergangsgesetz
EWN	Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH
GG	Grundgesetz
JEN	Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH

KENFO	Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung
KTE	Kerntechnische Entsorgung Karlsruhe GmbH
NachhG	Nachhaftungsgesetz
NBG	Nationales Begleitgremium
StandAG	Standortauswahlgesetz
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TransparenzG	Transparenzgesetz

Herausforderungen der Zwischenlagerung

BI	Bürgerinitiative
----	------------------

Zwischenlager in Deutschland

AZA	Abfall-Zwischenlager Ahaus
AZU	Abfall-Zwischenlager Unterweser
BZA	Brennelemente-Zwischenlager Ahaus
CASTOR	Behälter zur Aufbewahrung und zum Transport hochradioaktiven Materials
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
MW	Megawatt
MWIKL	Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
t SM	Tonnen Schwermetall
THTR	Thorium-Hochtemperatur-Reaktor
ZRA	Zentralstelle für radioaktive Abfälle

Internationaler Vergleich

PSI	Paul-Scherrer-Institut
ZWILAG	Zwischenlager Würenlingen AG

1 Einleitung

Der historische Betrieb von Kernkraftwerken stellt Deutschland vor die dringliche Herausforderung, sichere und langfristig tragbare Lösungen für die Lagerung und Entsorgung radioaktiver Abfälle zu finden. Die Zwischenlager fungieren hierbei als temporäre Aufbewahrungsorte für abgebrannte Brennelemente und andere radioaktive Abfälle, bis eine geeignete Endlagerstätte zur Verfügung steht (BASE 2023b).

Derzeit existieren 16 Zwischenlagerstandorte, an denen hochradioaktive Abfälle, bestehend aus Kernbrennstoffen aus Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren, sowie Abfälle aus der Wiederaufbereitung, gelagert werden. Weiterhin gibt es mehr als 30 Lagerstandorte und Sammelstellen für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (BMUV 2023). Der Prozess der Lagerung ist langwierig und sehr komplex, da er sowohl höchste Sicherheitsstandards und die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben erfüllen, aber auch die Akzeptanz der Bevölkerung sicherstellen muss. Somit stellt die Thematik der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle eine Vielzahl von technischen, politischen und gesellschaftlichen Herausforderungen dar (BASE 2023b; Götte, Rummel, und Plietsch 2023).

Die Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle sollte laut Standortauswahlgesetz (§1 Absatz 5 StandAG) im Jahr 2031 erfolgen und bis 2050 zur Einlagerung dieser Abfälle führen (Deutscher Bundestag 2016b, 210). Die im Jahr 2022 von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) kommunizierten Prozessverzögerungen führen dazu, dass diese Standortauswahl de facto in den Zeitraum von 2046 bis 2068 verschoben wurde. Ein 2024 erschienener Bericht des Öko-Instituts im Auftrag des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) schätzt, dass die Standortauswahl frühestens im Jahr 2074 erfolgen kann (Krohn u. a. 2024). Diese Verzögerung zieht Konsequenzen für die aktuell andauernde Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle nach sich, denn nun müssen hochradioaktive Abfälle über die ursprünglich anvisierte Lebensdauer der Behälter von 40 Jahren gelagert werden.

Eines der Ziele zur Überwindung der Herausforderungen ist es, neue Methoden und innovative Lösungen zur sicheren Lagerung radioaktiver Abfälle durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung zu finden und zu optimieren. Dies dient dazu, die Risiken eines Austritts von Radioaktivität zu minimieren, den Schutz von Menschen und Umwelt zu gewährleisten, sowie die physische Sicherheit der Lagerstätten und den Schutz vor möglichen Unfällen oder Angriffen sicherzustellen. Die wissenschaftliche Erforschung und Optimierung sind somit ein stark diskutierter Bestandteil der deutschen Energie- und Umweltpolitik, wobei strenge Richtlinien und Überwachungsmechanismen erforderlich sind, um die Sicherheit der Lagerstätten zu gewährleisten (BASE 2023b; Neuber 2010).

Auch die Schaffung von gesellschaftlicher Akzeptanz für die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Um das notwendige Vertrauen in den

Umgang mit radioaktivem Material zu schaffen und ebendiese langfristige Akzeptanz der Bevölkerung zur Zwischen- und Endlagerung zu stärken, sind umfassende Informationen und die Einbindung der Gesellschaft in den Entscheidungsprozess erforderlich (Götte, Rummel, und Plietsch 2023).

Um diese Thematik aufzugreifen, haben wir uns im Rahmen des Moduls der Nachhaltigkeitswerkstatt damit auseinandergesetzt und einen Dokumentarfilm „Einfach mal (zwischen-)lagern?!“ produziert und das dazugehörige Begleitkompendium erstellt.

Ziel dieser Seminararbeit ist die Ergänzung und Vertiefung unseres Dokumentarfilms und die Führung durch die Themen der Grundlagen, des rechtlichen Hintergrunds, der existierenden Zwischenlager in Deutschland und einem internationalen Vergleich mit anschließendem Ausblick und Fazit.

2 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen zur Thematik der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle dargestellt. Dies umfasst Definitionen, allgemeine Informationen zu den Entwicklungen in den früheren Jahren, die Wiederaufbereitung, die geltende Gesetzeslage und die Endlagerung ebendieser Abfälle. Ziel ist es, einen einheitlichen Wissensstand für alle Leser zu schaffen.

2.1 Definitionen

Bei der Thematik der radioaktiven Abfälle existieren viele wichtige Begriffe und Bezeichnungen, die im Folgenden erklärt und definiert werden.

2.2 Radioaktiver Abfall

Radioaktiver Abfall beschreibt radioaktive Stoffe, deren Verwendung nicht weiter möglich oder nicht gewünscht ist. Bei dem spontanen Zerfall von instabilen Atomen, die in radioaktiven Abfällen enthalten sind, wird ionisierende Strahlung ausgesendet. Diese Strahlung ist für Mensch und Umwelt gefährlich (BASE 2023b; Hirschhausen 2023). Eine Direktstrahlung muss daher abgeschirmt und eine Freisetzung radioaktiver Stoffe verhindert werden. Aufgrund der Langlebigkeit dieser Isotope, ist die Erhaltung der Abschirmung sowie die Verhinderung der Freisetzung über einen sehr langen Zeitraum sicherzustellen. Die radioaktiven Stoffe müssen nach dem Atomgesetz (AtG) geordnet und beseitigt, sprich endgelagert werden. Die radioaktiven Abfälle stammen größtenteils aus ehemals betriebenen Kernkraftwerken, aber auch aus Forschungsreaktoren sowie wissenschaftlich-technischen Einrichtungen. Ein geringer Teil stammt aus der Medizin (BASE 2023b)

Radioaktive Abfälle können hinsichtlich ihrer Eigenschaften voneinander unterschieden werden. Eine Unterteilung der Materialien erfolgt in Deutschland hinsichtlich dreier Eigenschaften (BASE 2023b):

- Aktivität⁴, also die Anzahl an Kernzerfällen in einer Sekunde (mittel- und schwachradioaktive Abfälle (LAW/MAW) $10^{10} - 10^{15}$ Bq/m³ und hochradioaktive Abfälle (HAW) $>10^{14}$ Bq/m³ (Lersow 2018, 14))
- freigesetzte Wärmeleistung (wärmeentwickelnde Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung)
- Fähigkeit eine nukleare Kettenreaktion aufrechtzuerhalten (Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe)

Die Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) kategorisiert den radioaktiven Abfall in sechs unterschiedliche Abfallarten (Bärenbold u. a. 2024):

- exempt waste (EW): Abfall, welcher keine Aufsicht benötigt, da er nicht als radioaktiver Abfall klassifiziert wird⁵
- very short-lived waste (VSLW): Abfall, welcher für einen kurzen Zeitraum eingelagert wird; üblicherweise medizinischer und forschungsbedingter Herkunft⁵
- very low-level waste (VLLM): Abfall, welcher eine höhere Radioaktivität besitzt, aber keine strenge Kontamination und Isolation benötigt; muss jedoch reguliert und bewacht werden⁵
- low-level waste (LLW) gleichzusetzen mit den schwachradioaktiven Abfällen
- intermediate-level waste (ILW) gleichzusetzen mit den mittelradioaktiven Abfällen und
- high-level waste (HLW), also die HAW.

Auf der europäischen Ebene werden die Abfälle ähnlich zu dem IAEO-System klassifiziert (Besnard u. a. 2019).

2.3 Zwischenlager

Nachdem Brennelemente im Reaktor für drei bis vier Jahre bestrahlt wurden, werden sie durch neue ausgetauscht und unmittelbar am Standort in Abklingbecken gelagert. Anschließend gäbe es die Möglichkeit diese zur Wiederaufbereitung zu schicken. Dies, sowie der Transport zur Wiederaufarbeitung in Nachbarländern, ist jedoch in Deutschland politisch verboten. Stattdessen wurden die Betreiber in den 2000er Jahren verpflichtet, in unmittelbarer Nähe der Reaktoren, sogenannte Zwischenlager zu errichten und zu betreiben. So gibt es in Deutschland sowohl zentrale als auch dezentrale Zwischenlager. Letztere werden auch als Standort-Zwischenlager bezeichnet, da diese sich direkt auf den jeweiligen Kernkraftwerksgeländen befinden. In den Standort-Zwischenlagern werden bestrahlte Brennelemente aus dem Betrieb des jeweiligen Kernkraftwerks, sowie LAW und MAW aufbewahrt. In Lubmin werden auch Brennelemente aus Reaktoren aus Rheinsberg,

⁴ Die Einheit der Aktivität ist Becquerel (Bq = 1/s)

⁵ <https://www.ensreg.eu/safe-management-spent-fuel-and-radioactive-waste/categorisation-radioactive-waste> (letzter Zugriff: 09.09.2024)

Greifswald und Karlsruhe gelagert. Teilweise werden in den zentralen Zwischenlagern auch Brennelemente aus Kernkraftwerken, oder HAW gelagert, die zur Wiederaufbereitung nach Frankreich und Großbritannien geschickt worden waren, größtenteils jedoch Brennelemente aus Forschungsreaktoren oder sonstige radioaktive Abfälle. Auch an den Standorten Biblis, Brokdorf, Isar und Philippsburg sollen weitere Abfälle aus der Wiederaufarbeitung zwischengelagert werden (BASE 2023b). Die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Sellafield (Großbritannien) werden an dezentrale Zwischenlager gesendet (BGZ 2021). Diese baulichen und technischen Einrichtungen sollen dabei eine Umgebung schaffen, die eine lange Lagerzeit der Abfallbehälter zulässt, ohne dass eine Korrosion der äußeren Behälterflächen zu unterstellen ist (Entsorgungskommission 2013). Bis zur endlagergerechten Konditionierung werden diese Abfälle in geeigneten Transport- und Lagerbehältern, sogenannten CASTOREN (siehe Kapitel 2.1.9.1), aufbewahrt. In Deutschland ist die Lagedauer auf maximal 40 Jahre ab Beladung des ersten Behälters befristet (BASE 2023b).

2.4 HAW

Die Abkürzung HAW steht für „high level (radio)active waste“ was die hochradioaktiven Abfälle meint. Diese sind vor allem bestrahlte Brennelemente und Abfall aus der Wiederaufbereitung (BASE 2023b). Mit ca. 27.000 m³ machen die Kernbrennstoffe nur ca. 5% des Abfallvolumens, aber ca. 99% der gesamten Radioaktivität aus (BASE 2023a). Verpackt werden HAW in CASTOR-Behältern (siehe Kapitel 2.1.9.1).

2.5 MAW/LAW

Die Abkürzung MAW steht für „medium active waste“, sprich mittelfradioaktive Abfälle und LAW für „low active waste“, also schwachaktive Abfälle. Sie entstehen vor allem während des Betriebs und Rückbaus von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren (BASE 2023a). Dabei handelt es sich beispielsweise um kontaminierte Werkzeuge, Schutzkleidung, verbrauchte Filter und auch Anlagenteile⁶. Je nach Abfallart werden verschiedene Konditionierungsverfahren wie z. B. Eindampfung, Zerkleinerung, Verbrennung oder Trocknung angewendet. Im Anschluss werden sie in die drei standardisierten Behältertypen verpackt: Zylindrischen Betonbehältern, Zylindrischen Gussbehältern und Containern (siehe Kapitel 2.1.9.2, 2.1.9.3 und 2.1.9.4)⁷. Mit ca. 620.000 m³ macht dieser Abfall ca. 95% des Abfallvolumens, aber nur ca. 1% der gesamten Radioaktivität aller Abfälle aus (BASE 2023a).

⁶ <https://zwischenlager.info/standort/obrigheim/> (letzter Zugriff: 25.06.2024)

⁷ <https://bgz.de/transport-und-lagerbehaelter/> (letzter Zugriff: 25.06.2024)

2.6 Kernbrennstoffe

Kernbrennstoffe sind radioaktive Materialien wie Uran und Plutonium, welche bei der Kernspaltung eine Kettenreaktion aufrechterhalten können. Bei der Reaktion entstehen als Spaltprodukte weitere hochradioaktive Elemente und es wird Energie in Form von Wärme frei. Um Sie herzustellen wird beispielsweise natürliches Uran abgebaut, ein Konzentrat gewonnen und dieses dann angereichert. Aus dem Endprodukt werden dann die Brennstäbe für Kernkraftwerke hergestellt⁸.

Zu den Kernbrennstoffen gehören u.a. Brennelemente aus Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren. Darüber hinaus werden sogenannte Kokillen, das sind in der Regel eingeschmolzene und verglaste Blöcke aus MAW und HAW aus der Wiederaufarbeitung, wie Kernbrennstoffe behandelt. Sie umfassen den überwiegenden Anteil der wärmeentwickelnden Abfälle (BASE 2023b).

2.7 Brennelemente

Brennelemente wurden in Deutschland in den Kernkraftwerken zur Energieerzeugung bestrahlt. Dort blieben sie für etwa drei bis vier Jahre im Reaktorkern dieser Kraftwerke, bis sie als „abgebrannt“ entfernt und durch neue ausgetauscht wurden. Durch die jahrelange Bestrahlung ist die Aktivität der abgebrannten Brennelemente deutlich höher als die der frischen Brennelemente. Aus diesem Grund bedarf es besonderer Vorsicht im Umgang mit ihnen. Neben kurzen Halbwertszeiten, betragen die Halbwertszeiten einiger Radionuklide mehrere Million (10^6) Jahre. Die Halbwertszeit von Thorium-232 liegt mit 14 Milliarden Jahren sogar noch darüber, vgl. Tabelle 1 (BASE 2023b; Lersow 2018).

Abbildung 1: Ausgewählte Radionuklide und deren Aktivität und Halbwertszeit (Darstellung nach Lersow 2018, 62)

Radionuklid	Spezifische Aktivität A_i^* in Bq/kg	Halbwertszeit
I-131	$4,60 \cdot 10^{18}$	8,0 Tage
Pu-239	$2,30 \cdot 10^{15}$	$2,4 \cdot 10^4$ Jahre
U-234	$4,06 \cdot 10^{11}$	$2,5 \cdot 10^5$ Jahre
U-235	$4,06 \cdot 10^{07}$	$7,0 \cdot 10^8$ Jahre
U-238	$4,06 \cdot 10^{07}$	$4,4 \cdot 10^9$ Jahre
Th-232	$4,06 \cdot 10^{06}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ Jahre

Abbildung 1 zeigt die Radiotoxizität von abgebrannten Brennelementen über die Zeit. Es ist zu erkennen, dass die Spaltprodukte in den ersten Jahrhunderten für einen Großteil der Radiotoxizität verantwortlich sind, während die minoren Aktinide (insb. Neptunium-237, Americium-241, -243, Curium-242 bis 248 und Californium-249 bis 252) und Plutonium aufgrund der vergleichsweise langen Halbwertszeiten über einen langen Zeitraum für eine hohe

⁸ <https://kernenergie.technology/atomkraftwerke/kernbrennstoff> (letzter Zugriff: 25.09.2024)

Radiotoxizität sorgen. Erst nach ca. 10.000 Jahren haben die abgebrannten Brennelemente das Strahlungsniveau von natürlich vorkommendem Uran erreicht.

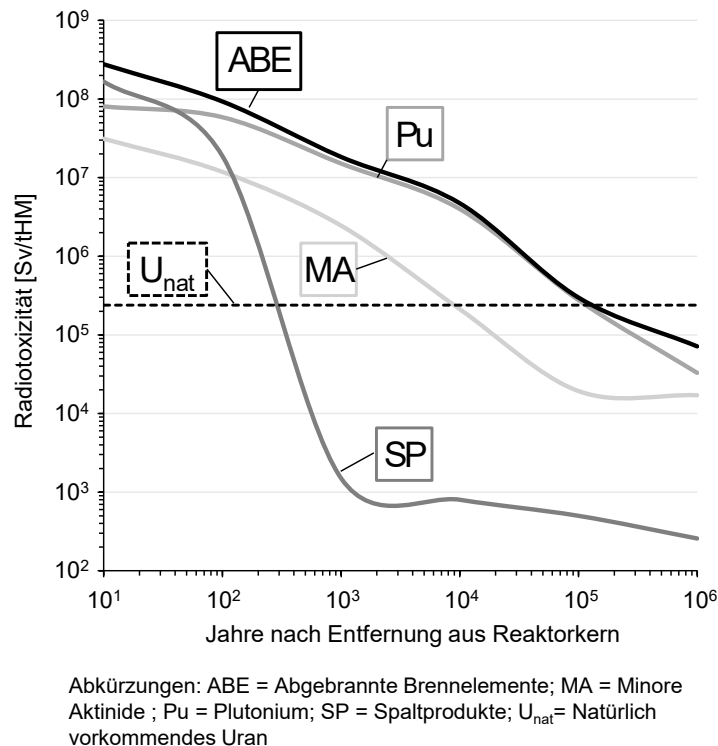


Abbildung 2: Radiotoxizität von abgebrannten Brennelementen und Bestandteilen über die Zeit (eigene Darstellung nach Gompper et al. (2010, Abb. 1)).

2.8 Nasslager

Zur besseren Handhabung der bestrahlten bzw. abgebrannten Brennelemente kommen diese in der Regel für mehrere Jahre in ein mit Wasser gefülltes Abklingbecken – das sogenannte Nasslager. Wie das Wort “Abklingen” schon andeutet, soll hierbei die Aktivität, aber auch die Nachzerfallswärme (siehe Kapitel 2.1.16), sinken. Je nach Art der Stoffe dauert dies unterschiedlich lange. Die Nasslager befinden sich in der Nähe des Reaktors und sind Bestandteil der Kernkraftwerke (Yim 2022).

2.9 Trockenlager

In Deutschland sind alle Zwischenlager, sowohl für LAW/MAW als auch für HAW, Trockenlager. Es gibt sie in unterschiedlichen Bauweisen mit verschiedenen Wandstärken und Hallenplänen (siehe Kapitel 5), jedoch müssen in allen Lagern die Behälter durch eine passive Luftzirkulation gekühlt werden.⁹ Außerdem müssen die Lager über technische Anlagen verfügen, um die

⁹ <https://www.bmu.de/themen/nukleare-sicherheit/zwischenlagerung/zwischenlager-fuer-waerme-entwickelnde-radioaktive-abfaelle-und-bestrahlte-brennelemente>

verschiedenen Behälter zu handhaben und die Stromversorgung auch in einem Störfall sicherzustellen (Entsorgungskommission 2023).

2.10 Behälter für radioaktive Abfälle

Beim Transport der radioaktiven Abfälle werden für die LAW/MAW und HAW verschiedene Behälter verwendet, wie in Abbildung 2 dargestellt.

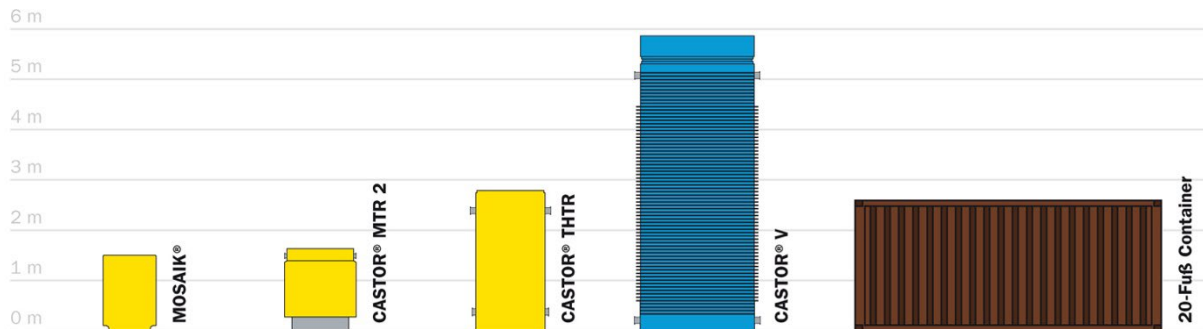


Abbildung 3: Größenvergleich der Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Abfälle (BGZ 2017)

2.10.1.1 CASTOR-Behälter

Die Bezeichnung CASTOR kommt von der Abkürzung der englischen Bezeichnung „Cask for storage and transport of radioactive material“ und wird für verschiedene Behältertypen wie MTR 2, THTR und V verwendet. Die Behälter werden für den Transport und die Lagerung bestrahlter Brennelemente aus Kernkraftwerken und für hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle genutzt. Für die Konstruktion der Castoren gibt es folgende spezifische Anforderungen (GRS 2019):

- massive metallische Behälter aus verformungsfähigem Gusseisen mit Kühlrippen
- ein überwachtes Doppeldeckeldichtsystem oder ein verschweißter Deckel
- spezielle Tragekörbe der Brennelemente zur Sicherstellung der Unterkritikalität¹⁰

In der Regel haben die Transport- und Lagerbehälter eine Höhe von 6 Metern und einen Durchmesser von 2,5 Metern (Hirschhausen 2023).

2.10.1.2 Ummantelte Betonabschirmung (UBA)

Bei der UBA handelt es sich um einen Zylindrischen Betonbehälter für trockene LAW und MAW. Er wurde für eine Lagerung im Endlager Konrad¹¹ konzipiert und kann bis zu 1500 kg radioaktiver Abfälle fassen. Der Behälter setzt sich aus einem inneren und äußeren Stahlmantel und einer dazwischen liegenden Betonwand zusammen. Die Dicke dieser Wand, sowie die Dichte des Betons können angepasst werden (GNS 2023b).

¹⁰ Bei der Unterkritikalität kann keine nukleare Kettenreaktion aufrechterhalten werden.

¹¹ Im sog. Schacht Konrad soll „zu Beginn der 2030er Jahre“ mit der Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen begonnen werden (vgl. <https://www.bge.de/de/konrad/>).

2.10.1.3 MOSAIK

Die Behälter dieses Typs werden für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, sowie als Transport- und Lagerbehälter für Kernbauteile verwendet. Sie bestehen aus Gusseisen und Kugelgrafit und können mit unterschiedlichen Volumina, Waddicken und Deckelsystemen ausgestattet werden.¹²

2.10.1.4 Konrad-Container

Für die Lagerung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle in das Endlager Konrad, sind die sogenannten Konrad-Container designed. Hierbei sind verschiedene Typen vorgesehen, die sich durch flexible Behälterportfolien und einen standardisierten Außenbehälter auszeichnen. Alle Typen sind als Abfallbehälterklassen I und II, nicht störfallfest/störfallfest und IP-2 und IP-2/F zugelassen (GNS 2023a).

2.11 Sicherheit

Bei der Zwischenlagerung steht der Begriff Sicherheit für die Vorsorge gegen Schäden durch radioaktive Strahlung. Diese Vorsorge bezeichnet Maßnahmen, die Schäden vorbeugen, die durch die Aufbewahrung von Kernbrennstoffen entstehen können. Sie muss nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erfolgen und stellt dabei eine zentrale Aufgabe der Zwischenlagerbetreiber dar (GRS 2010).

Laut dem BASE müssen Zwischenlager u. a. folgende sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen (BASE 2023b, 26):

- „Abschirmung der ionisierenden Strahlung vor allem durch die Behälter
- sicherheitsgerichtete Organisation und Durchführung des Betriebes
- sichere Handhabung der radioaktiven Stoffe
- Auslegung gegen Störfälle“

Die Zwischenlager selbst müssen dabei auch vor Einflüssen von innen und außen, wie Bränden und Umweltkatastrophen, geschützt sein.¹³

2.12 Sicherung

Die Sicherung der radioaktiven Abfälle umfasst den Schutz vor Störmaßnahmen und sonstiger Einwirkungen Dritter (SEWD), die das Ziel verfolgen, die radioaktiven Abfälle zu entwenden oder freizusetzen. Sie wird durch die Lagergebäude und die Behälter selbst gewährleistet. Bei der Sicherung ist der Schutz vor Terroranschlägen eine sehr relevante Aufgabe. Der Schutz wird durch das Zusammenwirken von Staat und Zwischenlagerbetreiber erreicht. Gemeinsam

¹² <https://www.gns.de/behaelter-equipment/schwach-mittelradioaktiv/mosaik/#offcanvasExample> (letzter Zugriff: 08.09.2024)

¹³ https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/sicherheit_sicherung/sicherheit-bewertung_node.html (letzter Zugriff: 26.09.2024)

haben sie ein neues Sicherungskonzept aufgestellt, dessen Fokus darauf liegt, das Eindringen und das darauffolgende Beschädigen der Behälter aus dem Inneren der Zwischenlager zu verhindern. Zu den Maßnahmen gehören unter anderem eine Mindesthöhe, eine Verstärkung der Außenwände der Lagergebäude, sowie eine lückenlose Barrierelinie der Öffnungsverschlüsse¹⁴ und Gebäudewände aus Stahlbeton. Um die Effektivität der Sicherungsmaßnahmen nicht zu gefährden, unterliegen die spezifischen Sicherungsvoraussetzungen der Geheimhaltung und können laut der Bundesregierung nicht öffentlich bekanntgegeben werden (Becker 2023).

Doch aufgrund der nicht gänzlich auszuschließenden terroristischen oder kriminellen Taten im Zusammenhang mit den Zwischenlagern, müssen die Betreiber den Nachweis führen, dass der erforderliche Schutz gegen SEWD gewährleistet ist. Dieser erforderliche Schutz wird laut dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) gewährleistet, wenn infolge der Freisetzung einer erheblichen Menge von radioaktiver Strahlung die Gefährdung von Leben und Gesundheit ausgeschlossen ist und eine Entwendung von Kernbrennstoffen verhindert werden kann (BASE 2023b).

2.13 Heiße Zelle

Eine sogenannte „Heiße Zelle“ ist ein abgeschirmter Raum, in dem es möglich ist, Abfallbehälter ferngesteuert zu handhaben, zu konditionieren und bei Bedarf zu lagern (Siempelkamp 2023). Sie wird benötigt, wenn ein Behälter z.B. zur Überprüfung des Inhalts oder einer Deckelbeschädigung geöffnet werden muss. Laut der Bundesregierung liegen derzeit jedoch keine Erkenntnisse vor, die die Errichtung einer Heißen Zelle an den Standorten der Zwischenlager notwendig machen würden (Becker 2023).

2.14 Endlager

Für eine dauerhafte Lagerung der radioaktiven Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahre, ist ein Standort notwendig, der die bestmögliche Sicherheit bietet. Solch ein Standort wird Endlager genannt und ist in Deutschland noch nicht vorhanden. Ein Standortauswahlverfahren (siehe Kapitel 3.1.6) für HAW ist derzeit im Gange – die Dauer dieses Prozesses und der Einlagerung ist jedoch noch ungewiss. Ein ehemaliger Standort für ein potenzielles Endlager für HAW war Gorleben, ein unterirdischer Salzstock in der Bundesrepublik Deutschland (BRD). Aufgrund von starken Protesten wurde dieser Standort jedoch aufgegeben (Eckhardt u. a. 2024).

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist ein Endlager für LAW/MAW der ehemaligen DDR in einem stillgelegten Salzbergwerk. Es hatte in der Auswahl von 10 möglichen Standorten die günstigsten Voraussetzungen, wobei der Stand von Wissenschaft

¹⁴ Öffnungsverschlüsse: Türen, Tore und Gitter

und Technik jedoch vernachlässigt wurde. Bereits in der Bauphase gab es Probleme und während der Einlagerung wurden die Behälter der radioaktiven Abfälle beschädigt, wodurch radioaktive Stoffe austraten. Nach der Wiedervereinigung Deutschlands kam durch eine Klage des BUND zu einem Einlagerungsstopp (Beyer 2004).

Im Jahr 2005 wurde die Genehmigung der Stilllegung des Endlagers unter Einschluss der verbleibenden radioaktiven Abfälle beantragt. Aufgrund von Einwendungen gegen den Ablauf der Stilllegung steht eine Genehmigung immer noch aus.¹⁵

Das ehemalige Salzbergwerk Asse II ist ein Endlagerstandort für LAW/MAW. In der Vergangenheit wurden 47.000 m³ radioaktiver Abfälle eingelagert, ohne eine mögliche Rückholung vorzusehen. Durch geologische Verwerfungen entstanden Risse, durch die Grundwasser ins Endlager eintrat. Zusätzlich wurden ungenehmigte radioaktiv kontaminierte Salzlösungen in die Anlage gepumpt, wodurch es 2010 zu dem Beschluss der Rückholung der Abfälle kam, um die Langzeitsicherung gewährleisten zu können. Die Rückholung wird mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen und vermutlich über Generationen erfolgen (BfS 2017).

Der Schacht Konrad ist ein Endlagerstandort für LAW und MAW in einem stillgelegten Eisenbergwerk in Salzgitter. Er soll ein Volumen von maximal 303.000 m³ radioaktiven Abfällen fassen und wurde aufgrund seiner langfristigen seismischen Stabilität, der natürlichen Barriere aus geologischen Formationen und seiner außergewöhnlichen Trockenheit ausgewählt. Das Endlager ist noch nicht fertig gebaut und auch der Fertigstellungstermin wurde mehrfach verschoben (Lersow 2018). Ursprünglich sollte das Endlager 2027 fertig werden, jedoch hält die BGE diesen Termin nicht mehr für einhaltbar. Es wird davon ausgegangen, dass die Arbeiten ca. zwei Jahre im Verzug sind – ein neuer Termin für die Inbetriebnahme des Endlagers steht noch nicht fest.¹⁶

2.15 Konditionierung

Die Konditionierung beinhaltet alle Schritte der Verpackung und Verarbeitung der radioaktiven Abfälle, um sie in Form von Abfallgebinden transport- und lagerfähig zu machen und die entsprechenden Genehmigungen zu erhalten. Diese Schritte können sich beispielsweise aus dem Trocknen, Verbrennen, Verpacken oder Zementieren der radioaktiven Abfälle zusammensetzen (Bandt 2018).

¹⁵ <https://www.bge.de/de/morsleben/kurzinformationen/stilllegung-des-endlagers-morsleben/>

¹⁶ <https://www.bge.de/de/konrad/themenschwerpunkte/themenschwerpunkt-das-endlager-konrad-ein-mehrgenerationenprojekt/wann-wird-konrad-fertig/>

2.16 Kritikalität und Kritikalitätssicherheit

Die Kritikalität bezeichnet den Zustand, bei der die Kettenreaktion der Kernspaltung aufrechterhalten wird. Dafür müssen so viele Neutronen entstehen, wie für die Spaltung benötigt werden. Um diesen Zustand bei der Zwischen- und Endlagerung zu verhindern, darf nur eine bestimmte Masse an Kernbrennstoffen pro Lagerbehälter gelagert werden (Neuber 2010).

Auch die Abschirmung und Verteilung der Brennelemente in den Behältern durch einen Tragkorb und die Aufnahme von Neutronen durch Neutronenabsorber spielt eine wichtige Rolle (Becker 2023).

2.17 Nachzerfallswärme

Nach der Kettenreaktion in den Brennelementen zerfallen die entstandenen Spaltprodukte weiter, bis sie ein stabiles Stadium erreichen. Bei diesem Zerfall wird Energie in Form von Wärme abgegeben, welche Nachzerfallswärme genannt wird. Jedes Spaltprodukt setzt bei seinem Zerfall unterschiedlich viel Wärme frei (Zahoransky 2022).

2.18 Wiederaufarbeitung

Das Ziel der Wiederaufarbeitung oder Wiederaufbereitung ist es, aus den abgebrannten Brennstoffen Uran-235 und Plutonium zurückzugewinnen und sie danach erneut für den Spaltprozess zu verwenden.¹⁷

Die Wiederaufarbeitung beginnt mit der Auftrennung der Brennstäbe und der Herauslösung des Brennstoffs durch Salpetersäure, bei der eine Salzlösung entsteht. Anschließend werden Uran und Plutonium aus dieser Lösung abgetrennt und die restliche Salzlösung wird zu einem Feststoff abgedampft. Mit Borosilikatglas wird dieser Feststoff vermischt und verglast. Das Endprodukt sind die Glaskokillen, die als HAW eingelagert werden müssen (siehe Kapitel 2.1.5).

Da das wiedergewonnene Uran nicht rein ist, wird es mit Plutonium zu einem Mischoxid verbunden, um ungünstige physikalische Eigenschaften abzuschwächen. Dieses wird als MOX-Brennstoff bezeichnet und muss nach dem Gebrauch ebenso als HAW eingelagert werden. Dies verursacht so ungefähr so viel radioaktiven Abfall, wie bei der Wiederaufarbeitung eingespart wurde (Neles und Pistner 2012).

Von 1971 bis 1990 wurden in der BRD bestrahlte Brennelemente in der Pilot-Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) zu Versuchszwecken wiederaufgearbeitet. Der Betrieb wurde danach jedoch eingestellt und die Anlage zurückgebaut. Bis 2005 wurde die Wiederaufarbeitung von bestrahltem Kernstoff aus deutschen Kernkraftwerken überwiegend

¹⁷ Vgl. Frieß et al. (2021) für eine tiefgehende sicherheitstechnische Analyse von Wiederaufbereitungsansätzen (sog. Transmutation und Partitionierung).

in Großbritannien und Frankreich durchgeführt. Seit dem Verbot des Transports zur Wiederaufarbeitung in das deutsche Ausland, findet dies nicht mehr statt (BASE 2023b).

3 Historische Aufarbeitung der Lagerung in Deutschland

Bestrahlte Kernbrennstoffe aus Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren sowie hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung werden an 16 Zwischenlagerstandorten in Deutschland gelagert. Zum Schutz von Menschen und Umwelt werden sie in Transport- und Lagerbehältern gelagert. Die Zwischenlagerung findet in speziell dafür geschaffenen Stahlbeton-Lagerhallen statt. Die Stoffe werden dort bis zu ihrer Ablieferung an ein noch zu findendes Endlager zwischengelagert, da die Zwischenlagerung keine Dauerlösung darstellt. Untertage kann der Schutz für einen so großen Zeitraum deutlich besser gewahrt werden, als über Tage (BASE 2023b).

Die LAW und MAW werden ebenfalls, bis zu einer Endlagerung im Schacht Konrad, in Zwischenlagern verwahrt. Diese Zwischenlagerstandorte stimmen teilweise mit denen der HAW überein. Die Lagerung der LAW und MAW ist jedoch nur für einen Zeitraum von 30 Jahren genehmigt. Die Berechnung dieser Genehmigungszeit hat jedoch keine Verzögerungen beim Bau des Endlagers berücksichtigt, weshalb es auch bei der Zwischenlagerung der LAW und MAW zu zeitlichen Problemen kommen kann (Becker 2021). Im Jahr 2024 betreibt die BGZ mbH nahezu alle deutschen Zwischenlager für HAW. Die Zwischenlager Jülich (Betreiber: Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH), das Zwischenlager Brunsbüttel (Betreiber: Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH & Co. oHG) und das Zwischenlager Nord bei Lubmin (Betreiber: EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH) sind Ausnahmen.

Um ein Verständnis für die aktuelle Struktur und die zahlreichen Zwischenlagerstandorte zu erlangen, ist es von Bedeutung, sich mit der historischen Entwicklung der nuklearen Entsorgung in Deutschland auseinanderzusetzen. Diese Entwicklung verdeutlicht, wie sich die gegenwärtige Praxis durch frühe Strategien und anschließende gesetzliche Veränderungen entwickelt hat (BASE 2023b).

3.1 Die frühen Jahre und die Wiederaufarbeitung

Das Ziel die radioaktiven Abfälle in der BRD in tiefen geologischen Formationen einzulagern, wird bereits seit den 1960er Jahren verfolgt (Köhnke 2017).

In den ersten Jahren der kommerziellen Nutzung der Atomenergie in der ehemaligen BRD lag der Fokus der Nutzung der Atomenergie hauptsächlich auf der mehrfachen Nutzung des Kernbrennstoffes für einen ressourcenschonenden Brennstoffkreislauf. Die Absicht bestand darin, in Wiederaufbereitungsanlagen das Plutonium in bestrahlten Brennelementen durch physikalische und chemische Trennverfahren vom restlichen Brennstoff abzutrennen und

anschließend einen neuen Brennstoff, der das Plutonium enthält, zu erzeugen¹⁸. Deutsche Projekte wie das Pilotprojekt in Karlsruhe und eine Anlagenplanung in Wackersdorf wurden jedoch verworfen.

Zur Umsetzung der Wiederaufbereitung sollte in Gorleben mit einer Wiederaufbereitungsanlage und einem Endlager das „Nukleare Entsorgungszentrum“ entstehen. Aufgrund massiver Proteste wurde jedoch der Plan zur Wiederaufbereitungsanlage im Jahr 1979 fallen gelassen (Köhnke 2017).

Daraufhin wandten sich die deutschen Kraftwerksbetreiber an ausländische Wiederaufbereitungsanlagen, vor allem in La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien). Die abgebrannten Brennstäbe wurden dorthin gebracht und nachdem sie wiederaufgearbeitet worden waren, kehrten die dabei angefallenen Abfälle, sowie die wiederaufgearbeiteten Brennstäbe nach Deutschland zurück (BASE 2023a).

Bei der Wiederaufbereitung durch das Purex-Verfahren werden Plutonium, Uran und hochradioaktive Spaltprodukte aus den abgebrannten Brennstäben abgetrennt (Stieglitz 1978). Das ursprüngliche Ziel war hierbei, das abgetrennte Plutonium als Brennstoff für Brutreaktoren zu verwenden, jedoch existierten keine wirtschaftlichen Kernkraftwerke dieses Typs (Neles und Pistner 2012).

Darüber hinaus wurde der Bedarf von Zwischenlagerkapazitäten erkannt und die zentralen Zwischenlager in Gorleben und Ahaus errichtet (Köhnke 2017).

Das Gebot der Wiederaufbereitung entfiel mit der 7. Novelle des AtG aus dem Jahr 1994 und die BetreiberInnen konnten nun zwischen der Wiederaufbereitung und der direkten Endlagerung der abgebrannten Brennelemente wählen. Im Jahr 1994 begann der Bau des zentralen Zwischenlagers Lubmin (Köhnke 2017).

In der DDR lag der Fokus der Entsorgung radioaktiver Abfälle auf geringen Kosten. Die LAW und MAW wurden im Endlager Morsleben, vor Fertigstellung des Lagers und vor Erteilen einer Genehmigung, eingeschüttet (siehe Kapitel 2.1.13). Der Bau erfolgte durch Zwangsarbeiter aus Konzentrationslagern und auch bei der Lagerführung waren die hohen Positionen von SS-Mitgliedern belegt (Beyer 2004). Der Stand von Wissenschaft und Technik wurde vernachlässigt und Bedenken durch Sicherheitsdefizite wurden von den zuständigen Gremien ignoriert. Zusätzlich zu den LAW/MAW wurden weitere, möglicherweise hochradioaktive Strahlenquellen ohne Genehmigung in Morsleben auf unbestimmte Dauer zwischengelagert. Das Thema der Endlagerung wurde von der Politik kaum erwähnt – wenn, dann nur um den sozialistischen Fortschritt zu symbolisieren. Das Sicherheitsrisiko wurde bis zur Wiedervereinigung Deutschlands als gering eingestuft. Selbst bei einem Einsturz des Endlagers solle keine Gefahr für die Umwelt bestehen (Beyer 2004).

¹⁸ <https://www.bfs.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/W/wiederaufarbeitung.html> (letzter Zugriff: 02.08.2024)

3.2 Veränderungen der 2000er Jahre

Im Zuge der im April 2002 gesetzlich verankerten Beendigung der kommerziellen Nutzung der Kernenergie durch das „Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“, fand in den 2000er Jahren eine umfassende Überarbeitung des Entsorgungskonzeptes statt, was eine Vielzahl von Transporten notwendig machte (BASE 2023a; Köhnke 2017).

Ab Mitte 2005 wurden im Rahmen der Veränderungen des Entsorgungskonzeptes die Abgabe bestrahlter Brennelemente an die Wiederaufbereitungsanlagen in Frankreich und Großbritannien verboten und die Betreibenden der Kernkraftwerke dazu verpflichtet, standortnah an den Reaktoren bzw. dezentral an anderen Standorten, Zwischenlager zu errichten und zu betreiben. Diese Standorte sind in Kapitel 5 dargestellt.

Diese Veränderungen führten zu einer deutlichen Verringerung der zeitaufwändigen Castor-Transporte, die von starken Bürgerprotesten in der ganzen Republik begleitet wurden.

Im Jahr 2011 wurde vom Bundestag die 13. Novelle des AtG und somit die endgültige Abschaltung der Kernkraftwerke in Form einer schrittweisen Abschaltung der Kernreaktoren beschlossen (Köhnke 2017).

Es gibt heutzutage nur noch wenige Transporte von hochradioaktiven Abfällen, vor allem von solchen, die bis 2005 bei der Wiederaufbereitung im Ausland entstanden sind und von Deutschland zurückgenommen werden mussten (BASE 2023a).

Bis 2011 wurden 108 Behälter aus La Hague (Frankreich) nach Gorleben und im Jahr 2020 6 Behälter aus Sellafield (England) nach Biblis gebracht. Weitere Transporte nach Brokdorf, Philippsburg und Isar folgen (BGZ 2021).

3.3 Derzeitige Situation der Endlager-Standortsuche

Im Jahr 2013 begann der Neustart der Standortsuche in Deutschland nach einem geeigneten Endlager für HAW, basierend auf dem „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle“, auch bekannt als Standortauswahlgesetz (siehe Kapitel 3.1.6). Diese Standortsuche soll gem. §1 Abs. 5 StandAG im Jahr 2031 abgeschlossen sein. Dieser zeitliche Rahmen dient als Orientierung und darf, laut Gesetzgeber, jedoch aufgrund sachlicher Gründe auch überschritten werden.

Der Beginn des Betriebes eines Endlagers wurde für das Jahr 2050 im Nationalen Entsorgungsprogramm im Jahr 2015 festgelegt. Laut dem Kommissionsbericht wäre dies, in Form eines ca. 20 bis 30 Jahre dauernden Einlagerungsbetriebes gemäß den Bedingungen, bis Ende des Jahrhunderts vorstellbar (Deutscher Bundestag 2016a).

Somit ergibt sich eine zeitliche Diskrepanz zwischen dem Erlöschen der derzeitigen Aufbewahrungsgenehmigungen und dem Zeitpunkt, ab dem die Zwischenlager vollständig

geräumt sein werden. Diese zeitliche Lücke macht eine verlängerte Zwischenlagerung notwendig.

4 Rechtlicher Hintergrund

Bei der Zwischenlagerung ist das Zusammenspiel vieler AkteurInnen und eine durchdachte Planung wichtig. Die AkteurInnen haben die Zuständigkeit über verschiedene Aufgabenbereiche, die im Zusammenhang mit der Zwischen- und Endlagerung stehen. Um diese zu koordinieren, existieren viele Gesetzestexte und Regulierungen, die einen rechtlichen und zeitlichen Rahmen schaffen – unter anderem Gesetze, die die Finanzierung regulieren und die Verantwortung der Entsorgung festlegen.

5 Gesetzestexte zur Regulierung der Zwischenlagerung

Im Themengebiet der Zwischen- und Endlagerung treffen viele unterschiedliche Verantwortungsbereiche aufeinander. Dementsprechend zahlreich sind die rechtlichen Grundlagen. Im Folgenden ist eine Auswahl an relevanten Gesetzestexten zusammengefasst.

5.1 Grundgesetz (GG)

Im Grundgesetz Art 73 ist die Zuständigkeit des Bundes über die Erzeugung und Nutzung der Atomenergie für friedliche Zwecke, die Errichtung von Anlagen zum Schutz vor der freiwerdenden Radioaktivität und der Beseitigung der radioaktiven Stoffe festgelegt (Art. 73 Absatz 1 GG)¹⁹. Dies schafft eine Grundlage für die kommerzielle Nutzung von Kernenergie und der Handhabung der radioaktiven Stoffe.

5.2 Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz (AtG))

Das Atomgesetz stellt die geordnete Beendigung der gewerblichen Nutzung der Atomenergie zur Energieversorgung sicher und gewährleistet den Betrieb bis zu diesem Zeitpunkt. Ebenfalls sollen Leben, Gesundheit und Sachgüter vor Schäden geschützt werden, die durch Radioaktivität entstehen. Im Falle eines Schadens, muss dieser finanziell ausgeglichen werden (§§ 28-30 AtG)²⁰. Dieser Schutz beinhaltet auch die Sicherstellung der inneren und äußeren Sicherheit der BRD. Ebenfalls sollen mit Hilfe des AtG internationale Verpflichtungen der BRD auf dem Gebiet der Kernenergie und des Strahlenschutzes erfüllt werden (§ 1 Abs. 1-4 AtG).

¹⁹ <https://www.gesetze-im-internet.de/gg/BJNR000010949.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

²⁰ <https://www.gesetze-im-internet.de/atg/BJNR008140959.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

5.3 Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung (BfKEG)

Im „Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung (BfE)“ ist die Errichtung dieser Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV ehem. BMU) beschrieben. Die Verwaltung, Genehmigung und Überwachung von Anlagen zur Sicherstellung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle wird vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) übernommen. Ebenso ist es für die Beförderung und Aufbewahrung der radioaktiven Stoffe, sowie der kerntechnischen Sicherheit, die es durch andere Gesetzestexte zugewiesen bekommt, verantwortlich. Das BfS steht unter der Aufsicht des BMUV. Wenn es Aufgaben aus einem anderen Geschäftsbereich übernimmt, dann hat es den fachlichen Weisungen des Bundes Folge zu leisten (§§ 2, 3 BfKEG)²¹.

Das BfE wurde in das „Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung“ umbenannt, dadurch änderte sich der Name des Gesetzes in „Gesetz über die Errichtung eines Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung“, die Abkürzung blieb jedoch bestehen.

5.4 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG)

Im Strahlenschutzgesetz sind Regelungen für den langfristigen Schutz des Menschen und im Weiteren, den Schutz der Umwelt in Bezug auf die menschliche Gesundheit vor den Folgen ionisierender Strahlung, festgelegt. Diese Regelungen betreffen explizit geplante, bestehende und im Notfall auftretende Expositionssituationen. Diese Expositionssituationen werden ebenfalls in dem StrlSchG erklärt (§§ 1, 2 StrlSchG)²².

Es werden Strahlenschutzgrundsätze und der Vorgang der Vorabkontrolle bei radioaktiven Stoffen und Radioaktivität vorgeschrieben. Dazu gehört die Errichtung von Anlagen zur Erzeugung und zum Umgang mit radioaktiven Stoffen, der Transport der radioaktiven Stoffe, sowie die Festlegung von Grenzwerten der Strahlendosis für beruflich exponierte Personen und anderer Anforderungen an die Ausübung von Tätigkeiten mit radioaktiven Stoffen (§§ 6, 10, 76 StrlSchG).

5.5 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Die Strahlenschutzverordnung dient dazu, grundlegende Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Aussetzung von radioaktiver Strahlung festzulegen. Wie in dem StrlSchG sind der Strahlenschutz bei Expositionssituationen, die Vorabkontrolle bei radioaktiven Stoffen und weitere Themengebiete wichtige Inhaltspunkte. Das StrlSchV bezieht

²¹ <https://www.gesetze-im-internet.de/bfkeg/BJNR256300013.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

²² <https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/BJNR196610017.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

sich aber auf spezifischere Details und konkretisiert die Umsetzung der Ziele (§§ 28, 71-81 StrlSchV)²³.

5.6 Standortauswahlgesetz (StandAG)

Das Standortauswahlgesetz ist zur Regelung des Standortauswahlverfahrens verfasst worden. Der Vorgang des Standortauswahlverfahrens soll partizipativ, wissenschaftlich basiert, transparent, selbsthinterfragend und lernend sein. Bei dem Standortauswahlverfahren geht es um die Wahl eines Endlagerstandortes, für die im Inland verursachten hochradioaktiven Stoffe, der die bestmögliche Sicherheit für Mensch und Umwelt bereitstellt. Die Endlagerung soll für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet sein. Dazu gehören, dass zukünftige Generationen vor einer unzumutbaren Last und Verpflichtung geschützt werden müssen. Um dieses Vorhaben umzusetzen ist gesetzlich festgelegt, dass keine Abkommen mit dem Ausland geschlossen werden dürfen, um die in Deutschland angefallenen radioaktiven Abfälle außerhalb Deutschlands zu lagern. In dem StandAG sind die in Deutschland verfügbaren Wirtsgesteine für eine Endlagerung und die Anforderungen an dieses Endlager festgehalten. Es schreibt die Möglichkeit der Rückholung der radioaktiven Abfälle, im Betriebszeitraum und der Bergungsmöglichkeit für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem geplanten Verschluss des Endlagers, vor. Ein Standort für dieses Endlager sollte bis zum Jahr 2031 gefunden und festgelegt sein. Die Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen muss ebenfalls die gleichen Ansprüche erfüllen und kann am selben Standort erfolgen (§ 1 StandAG)²⁴.

Am 28.09.2020 wurde ein Zwischenbericht über die Teilgebiete von der BGE veröffentlicht, der den ersten Teil der Phase I der Endlagersuche abschließt. In diesem ersten Teil wurden Teilgebiete mit günstigen geologischen Voraussetzungen, wie einer geringen Durchlässigkeit von Gasen und Flüssigkeiten (Tongestein), einer hohen Wärmeleitfähigkeit (Steinsalz) oder geringer Wasserlöslichkeit (Kristallingestein) ermittelt. Anschließend daran wird erforscht, welche Standorte oberirdisch erkundet werden. Das Standortauswahlverfahren befindet sich zum Veröffentlichungsdatum dieses Dokuments in diesem Phasenteil. In Phase II werden diese Erkundungen durchgeführt und die Standorte miteinander verglichen und festgelegt, welche Gebiete unterirdisch erkundet werden sollen. In Phase III werden diese unterirdischen Erkundungen durchgeführt und ein Endlagerstandort vorgeschlagen (BGE 2020).

2022 veröffentlichte die BGE eine zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens, in der der zweite Teil der Phase I im 2. Halbjahr 2027 abgeschlossen werden soll. Für die Phase II wird ein Zeitaufwand von 10 bis 12 Jahren und für Phase III, je nach Wirtsgestein, 13 bis 23 Jahre abgeschätzt (BGE 2022).

²³ https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/BJNR203600018.html (letzter Stand: 03.09.2024)

²⁴ https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/BJNR107410017.html (letzter Stand: 03.09.2024)

Nach diesem Zeitplan wird ein Endlagerstandort frühestens im Jahr 2050 gefunden sein, was fast zwei Jahrzehnte nach dem gesetzlich festgelegten Zeitpunkt im Jahr 2031 liegt.

5.7 Verordnung über Anforderungen und Verfahren zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Atomrechtliche Entsorgungsverordnung (AtEV))

In der AtEV sind die Anforderungen der Dokumentation und Informationsübergabe des erwarteten jährlichen Anfalls von radioaktiven Stoffen niedergeschrieben. Die Menge der Abfälle für die gesamte Dauer des Tätigkeitszeitraumes muss vorab geschätzt und der zuständigen Behörde mitgeteilt werden. Diese Verpflichtung gilt für alle, die sich mit dem Besitz, Transport oder der anderweitigen Handhabung der radioaktiven Abfälle oder dem Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung befassen. Die Behandlung und Verpackung, sowie die Pflichten bei der Abgabe und dem Empfang von radioaktiven Abfällen werden in der AtEV thematisiert. Die radioaktiven Abfälle müssen nach der Entstehung an einem Zwischenlager abgeliefert werden, es sei denn sie fallen unter die Ausnahmen der Ablieferungspflicht, die ebenfalls in der AtEV festgelegt sind. Eine solche Ausnahme besteht, wenn die Abfälle bereits für eine anderweitige Lagerung zugelassen oder die Abfälle noch nicht freigegeben wurden (§ 6 AtEV)²⁵. Bis die radioaktiven Abfälle einer Anlage zur Endlagerung zugeführt werden können, müssen die Abfälle von den Ablieferungspflichtigen zwischengelagert werden. Diese Zwischenlagerung kann auch durch eine Gemeinschaft von Ablieferungspflichtigen oder durch Dritte erfolgen (§§ 1-4, 7 AtEV).

Die Rolle der Dritten hat die Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ) übernommen (BASE 2023b).

5.8 Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung (EntsorgNeuOG)

Die nachfolgenden Gesetze sind in dem EntsorgNeuOG enthalten. Ebenso ist der Abschluss eines öffentlich-rechtlichen Vertrags zwischen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie mit den westdeutschen BetreiberInnen von kerntechnischen Anlagen und ihren Konzernobergesellschaften und dessen Evaluierung erwähnt. In diesem Vertrag geht es um die Übertragung der radioaktiven Abfälle und die Übergabe derer an den Bund (Art. 1-9 EntsorgNeuOG)²⁶.

Vor der Neuordnung haben private Unternehmen die finanziellen Ressourcen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle gehandhabt und konnten in eingeschränktem Rahmen entscheiden, wie das Kapital investiert wurde. Diese Vorgänge mussten jedoch nicht öffentlich gemacht werden,

²⁵ <https://www.gesetze-im-internet.de/atev/BJNR217210018.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

²⁶ <https://www.gesetze-im-internet.de/vkenog/BJNR011409017.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

was zum Missbrauch dieses Kapitals führte. Um die Zahlungen zur Entsorgung dennoch leisten zu können, wurden Vermögenswerte veräußert. Wenn diese nicht zur Zahlung ausreichen würden, hätte die Zahlung verzögert oder Insolvenz angewendet werden müssen. In diesem Fall hätten die SteuerzahlerInnen die verbliebenen Kosten tragen müssen (Bärenbold u. a. 2024).

Mit der Neuordnung wurde die Haftpflicht und die finanzielle Verantwortung der privaten Unternehmen an die Regierung übergeben. Dafür mussten Zahlungen an einen Fonds erfolgen, welcher in den Kapiteln 3.1.8.1 und 3.3 näher erläutert wird. Die Unternehmen sind somit nur noch für den Rückbau der kerntechnischen Anlagen verantwortlich. Durch das Transparenzgesetz (siehe Kapitel 3.1.8.3) müssen die verbleibenden Rückstellungen und finanziellen Mittel der Kernkraftwerksbetreiber öffentlich einsichtbar sein. Durch eine weitere Verordnung ist es den privaten Unternehmen nicht mehr möglich sich den finanziellen Verpflichtungen, durch eine Umstrukturierung des Unternehmens, zu entziehen (Wimmers, Bärenbold, u. a. 2023).

Die ostdeutschen kerntechnischen Anlagen waren von Beginn an im Besitz der staatlichen Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH²⁷. Diese trägt auch die Verantwortung für den Rückbau und die finanziellen Verpflichtungen. Das Bundesministerium für Finanzen ist alleiniger Gesellschafter und Geldgeber der EWN (Wimmers, Bärenbold, u. a. 2023).

5.8.1.1 Entsorgungsfondsgesetz (EntsorgFondsG)

Das Entsorgungsfondsgesetz ist die Kurzform für „Gesetz zur Errichtung eines Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung“. Mit dem Inkrafttreten des Gesetzes entstand der Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung (KENFO) (Wimmers, Göke, u. a. 2023). Er besteht dazu, die sichere Entsorgung der entstandenen und zukünftig entstehenden radioaktiven Abfälle, aus der gewerblichen Nutzung der Kernenergie für die Energieversorgung in Deutschland, sicher zu stellen. Die Aufgaben und Organisation des Fonds, der Vorstand des Fonds und die Organisation und Verwendung des Fondsvermögens werden in dem EntsorgFondsG beschrieben. Diese enthalten die Entsorgungskosten und Zahlungszeitpunkte, sowie Ratenzahlungsvereinbarungen und die Aufteilung in getrennte Konten für die Einzahlenden. Nach dem EntsorgFondsG sind die ehemaligen Betreibenden durch die Zahlung eines Risikoaufschlags nicht verpflichtet, später aufkommende Kosten zu übernehmen (§§ 1, 3-5, 7-10 EntsorgFondsG)²⁸.

²⁷ Nähere Erklärung zur EWN in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

²⁸ <https://www.gesetze-im-internet.de/entsorgfondsg/BJNR011410017.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

5.8.1.2 Entsorgungsübergangsgesetz (EntsorgÜG)

Das Entsorgungsübergangsgesetz ist die Kurzform vom „Gesetz zur Regelung des Übergangs der Finanzierungs- und Handlungspflichten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle der Betreiber von Kernkraftwerken“. In ihm ist der Übergang der Finanzierungspflicht für Anlagen zur Endlagerung, sowie der Übergang der Handlungspflicht für die Entsorgung radioaktiver Stoffe detailliert festgehalten. Ebenso ist in dem EntsorgÜG eine Auflistung der Zwischenlager für radioaktive Abfälle enthalten, die am 1. Januar 2019 an die BGZ übertragen wurden und von welchen Zwischenlagerstandorten die Betriebskosten durch den KENFO finanziert werden (§§ 1, 2, Anhang EntsorgÜG)²⁹.

5.8.1.3 Transparenzgesetz (TransparenzG)

Transparenzgesetz ist die Kurzform für „Gesetz zur Transparenz über die Kosten der Stilllegung und des Rückbaus der Kernkraftwerke sowie der Verpackung radioaktiver Abfälle“. In ihm stehen Regelungen zur jährlichen Informationsübergabe des Betreibers der kerntechnischen Anlagen an das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. In dieser Informationsübergabe muss eine detaillierte Aufstellung der gebildeten Rückstellungen für die Stilllegungen und für den Abbau ihrer Anlagen enthalten sein. Diese sind extern zu begutachten. Ebenso festgehalten ist die Vorschrift eines jährlichen Berichts der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag, der die erhaltenen Informationen des jeweiligen Jahres zusammenfasst (§§ 1, 2, 7 TransparenzG)³⁰.

5.8.1.4 Nachhaftungsgesetz (NachhG)

Das Nachhaftungsgesetz oder auch „Gesetz zur Nachhaftung für Abbau- und Entsorgungskosten im Kernenergiebereich“ beschreibt, die Übertragung der Haftung der BetreiberInnen der kerntechnischen Anlagen an ihre GesellschafterInnen, wenn sie die Zahlungsverpflichtungen zum Rückbau der Kerntechnischen Anlagen und zur Einzahlung in den KENFO nicht erfüllen können. Die dadurch entstehenden Kosten werden ebenfalls an die GesellschafterInnen übertragen. Diese Zahlungspflicht besteht auch, wenn die BetreiberInnen nicht mehr bestehen und auch nachdem die BGZ die Leitung der Zwischenlager übernommen hat. Diese Haftung erlischt erst dann, wenn die radioaktiven Abfälle der BetreiberInnen vollständig an ein Endlager transferiert und diese Anlage verschlossen wurde (§§ 1-4 NachhG)³¹.

²⁹ https://www.gesetze-im-internet.de/entsorg_g/BJNR012000017.html (letzter Stand: 03.09.2024)

³⁰ <https://www.gesetze-im-internet.de/transparenzg/BJNR012500017.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

³¹ <https://www.gesetze-im-internet.de/nachhg/BJNR012700017.html> (letzter Stand: 03.09.2024)

6 Relevante Akteure

Bei der Zwischen- und Endlagerung sind viele verschiedene AkteurInnen, mit unterschiedlichen Zuständigkeitsbereichen, beteiligt. Im Folgenden sind die relevantesten AkteurInnen und ihre Aufgaben näher erläutert.

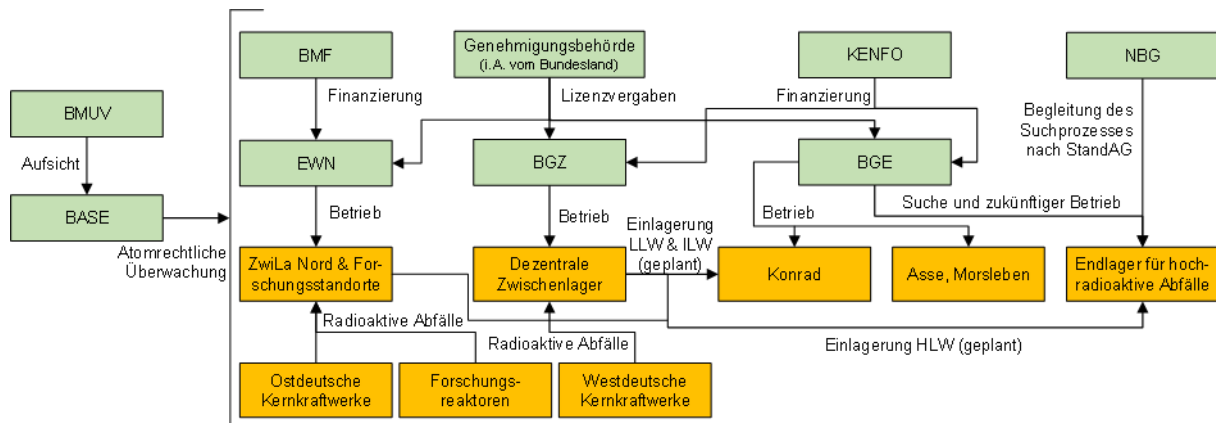


Abbildung 4: Übersicht der AkteurInnen des nuklearen Rückbaus in Deutschland (Hirschhausen und Wimmers 2023, 290)

6.1 Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ)

Die BGZ hat die Verantwortung über die sichere Aufbewahrung der HAW in Deutschland. Von ihr werden die Zwischenlager der ehemaligen BRD, außer dem in Brunsbüttel³², betrieben (Brammer 2018).

Die BGZ ist ebenfalls dazu verpflichtet radioaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung im Ausland in ihren Besitz zu nehmen, wenn diese die Aufnahmeanforderungen der jeweiligen Zwischenlagerstandorte erfüllen. Die BGZ hat außerdem die Führung der Genehmigungsverfahren ihrer Zwischenlagerstandorte inne. Sie muss der Genehmigungsbehörde, dem BASE, die Nachweise erbringen, dass alle benötigten Sicherheitsanforderungen erfüllt sind (BASE 2023b).

6.2 EWN-Gruppe

Zur EWN-Gruppe gehören die Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH (EWN), die Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH (JEN), sowie die Kerntechnische Entsorgung Karlsruhe GmbH (KTE). Sie liegen vollständig in der Hand des Bundes und werden durch Bundes- und Landesmitteln finanziert. Die JEN ist für das Zwischenlager in Jülich und die EWN für die Entsorgungsanlagen und Zwischenlager in Lubmin und den Rückbau der beiden kerntechnischen Anlagen aus der ehemaligen DDR verantwortlich. Die KTE ist für den

³² <https://zwischenlager.info/#toggle-id-17> (letzter Zugriff: 29.06.2024)

Rückbau der kerntechnischen Anlagen am Standort Karlsruhe/KIT Campus Nord in Baden-Württemberg verantwortlich³³.

6.3 Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)

Das BASE ist als „Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit“ (BfE) ab 2016 neu aufgebaut worden, bis es 2020 umbenannt wurde. Es prüft die Anträge für die Zulassung der Aufbewahrung und Transporte³⁴ hochradioaktiver Abfälle, welche die ZwischenlagerbetreiberInnen stellen. Das BASE ist verpflichtet eine Genehmigung zu erteilen, wenn alle gesetzlichen Anforderungen erfüllt wurden. Es leistet die Öffentlichkeitsarbeit zu den Genehmigungsverfahren und initiiert und begleitet Forschungsprojekte zum Thema nukleare Entsorgung. Die Endlagersuche wird ebenfalls vom BASE reguliert. Damit hat es auch die atomrechtliche Aufsicht über die möglichen Endlagerstandorte Konrad und Morsleben und über die Schachanlage Asse II (siehe Kapitel 2.1.13) und ein hypothetisches Endlager für hochradioaktive Abfälle (BASE 2023b).

6.4 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV)

Das BMUV hält die Fach- und Rechtsaufsicht über das BASE und die zuständigen Landesbehörden, trägt die politische Aufsicht und kann Weisungen erteilen. Es ist der Träger der Beteiligungsverwaltung der BGE, vertritt also die BRD im Aufsichtsrat der BGE und arbeitet am jährlichen Beteiligungsbericht des Bundes mit (BASE 2023b).

6.5 Landesbehörden

Die jeweiligen Landesbehörden (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein) überprüfen den sicheren Betrieb der Zwischenlager in ihrer Zuständigkeit und führen somit die Aufsicht über diese Zwischenlager (BASE 2023b).

6.6 Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

Die BGE sammelt als bundeseigenes Unternehmen alle relevanten Daten für die Suche eines Endlagerstandorts für die hochradioaktiven Abfälle, wertet diese aus und führt die darauffolgenden Erkundungsarbeiten aus (BASE 2023b). Wenn ein Endlagerstandort genehmigt wurde, dann ist sie für die Errichtung und den Betrieb dieses Endlagers verantwortlich. Wenn ein Endlager stillgelegt wird, ist sie ebenfalls für diesen Prozess

³³ <https://www.ewn-gmbh.de/unternehmen/ewn-gruppe> (letzter Zugriff: 21.08.2024)

³⁴ https://www.base.bund.de/DE/base/bundesamt/aufgaben/aufgaben_node.html (letzter Zugriff: 28.09.2024)

zuständig. Seit April 2017 ist sie die Betreiberin der Schachanlage Asse II und der Endlager Konrad und Morsleben³⁵.

6.7 Nationales Begleitgremium (NBG)

Das Nationale Begleitgremium begleitet das Standortauswahlverfahren und sorgt für eine Berücksichtigung des Allgemeinwohls und ein transparentes Vorgehen. Das Gremium setzt sich aus 12 anerkannten Personen des öffentlichen Lebens und sechs BürgervertreterInnen zusammen, die alle keinerlei wirtschaftlichen Interessen in Bezug auf die Endlagersuche haben dürfen. Alle MitgliederInnen wurden vom Bundestag und dem Bundesrat zu ihrer Position berufen. Die BürgervertreterInnen werden in einem Beteiligungsverfahren nominiert und von dem/der BundesministerIn ernannt³⁶.

7 Finanzierung

Die Finanzierung der Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen ist ein zentraler Bestandteil der langfristigen Entsorgungsstrategie Deutschlands. Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie und der Verpflichtung zur sicheren Aufbewahrung der entstehenden Abfälle, bis zu ihrer endgültigen Entsorgung, müssen die finanziellen Rahmenbedingungen klar definiert und nachhaltig gesichert sein.

Grundsätzlich obliegt das Tragen der Kosten für die Stilllegung (inkl. Rückbau) der kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen den Abfallverursachern (BMU 2015). Der KENFO stellt die Entsorgung der radioaktiven Abfälle finanziell sicher, da dieser die bei der Übertragung der Entsorgungszuständigkeiten entstehenden Kosten erstattet und die Mittel bereitstellt (siehe Kapitel 3.1.8.1 und 3.1.8.2) (KENFO 2023).

Laut BMUV verteilte sich der notwendige Aufwand im Jahre 2012 auf folgende Bereiche (BMU 2015):

1. Für ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle
 - a. Zu 64,4% von Kernkraftwerken
 - b. Zu 6% von der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
 - c. Zu 29,6% von sonstigen kerntechnischen Anlagen
2. Für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle
 - a. Zu 96,5% von Kernkraftwerken
 - b. Zu 0,7% von der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
 - c. Zu 2,8% von sonstigen kerntechnischen Anlagen

³⁵ <https://www.bge.de/de/abfaelle/akteure-und-verantwortlichkeiten/>

³⁶ https://www.nationales-begleitgremium.de/DE/WerWirSind/Gremium/gremium_node.html

Die BetreiberInnen der Atomkraftwerke haben für die sichere Verwahrung der Hinterlassenschaften rund 24 Milliarden Euro bereitgestellt. Im Jahre 2017 haben diese den Betrag an einen öffentlich-rechtlichen Fonds überwiesen. Die Stiftung „Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung“ (KENFO) ist für die Verwaltung und gewinnbringende Anlage des Geldes verantwortlich. Die gesetzliche Regelung ist unter Kapitel 3.1.8 nachzulesen. Daraus werden alle Kosten für die Zwischen- und Endlagerung finanziert. Sollte der Fonds keine Ressourcen mehr aufweisen, werden die Kosten von den SteuerzahlerInnen getragen – die Betreiber haften in diesem Fall nicht, da nach §7 Absatz 3 des EntsorgFondsG (siehe Kapitel 3.1.8.1) die Betreibenden mit der Zahlung des Risikoaufschlags keine Verpflichtung haben, aufkommende Kosten zu tragen (Wimmers, Göke, u. a. 2023).

Der KENFO ist durch Inflation und Rendite von der weltweiten Wirtschaftssituation abhängig. Der Erfolg des KENFO hängt somit von unvorhersehbaren wirtschaftlichen Entwicklungen ab und kann durch eine hohe Inflation, wie durch einen Krieg, stark beeinträchtigt werden (Eckhardt u. a. 2024). Ob der Fonds angesichts der durch die Verzögerung des Standortauswahlprozesses für die erwartbar steigenden Kosten aufkommen werden kann, bleibt aus heutiger Sicht, insbesondere wegen der Unsicherheit auf den Finanzmärkten und über die lange Zeit, sowie der fehlenden Kostendatengrundlage, unklar (Ott u. a. 2024; Awawda und Wimmers 2024).

Das BASE, aber auch die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, stellen dem Fonds die Kosten, die im Rahmen des Standortauswahlverfahrens entstehen, in Rechnung. Darunter fallen die Kosten für folgende Aufwendungen:

1. im Zuge des Beteiligungsverfahrens
2. im Zusammenhang mit der Ermittlung von Teilgebieten und Standortregionen
3. wegen der über- und untertägigen Erkundung
4. die Forschung und Entwicklung im Zusammenhang mit der Auswahl des Standortes³⁷.

Die Finanzierung wird unter anderem im StandAG, dem EntsorgFondsG, dem EntsorgÜG, dem TransparenzG und dem NachhG geregelt. Diese können unter Kapitel 3.1.6 und 3.1.8 nachgelesen werden.

Die untenstehende Tabelle gibt einen Überblick über die (nicht-)refinanzierbaren Ausgaben für die Zwischen- und Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen des KENFO.

³⁷ <https://www.base.bund.de/DE/themen/soa/finanzierung/finanzierung.html> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

Abbildung 5: Ausgabensätze im Finanzplan des BMUV für die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle (Wimmers, Göke, u. a. 2023, 30)

Aufgabe	Refinanzierbar über...	Ausgabensätze im Finanzplan in Mio. Euro					
		2020	2021	2022	2023	2024	2025
Projekt Konrad	EndlagerVIV	367,4	295,1	323,5	362,4	376,4	341,2
Stilllegung Schachtanlage Asse	Nicht refinanzierbar	195,8	174	162,5	191,5	217,7	236,1
Stilllegung Endlager Morsleben	Nicht refinanzierbar	67,5	66,6	66,8	72,3	74,4	77,3
Standortauswahlverfahren	StandAG	24,4	41,55	36,9	54,1	57,9	62,9
Projekt Gorleben	StandAG	15,3	14,2	17,5	21,5	25,5	25,4
Produktkontrollmaßnahmen	Gebühren bei Abfallverursachern	14,3	14,37	26,3	27,5	K.A.	K.A.
Salzgitterfonds	Nicht refinanzierbar	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Morslebenfonds	Nicht refinanzierbar	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Assefonds	Nicht refinanzierbar	3	3	3	3	3	3
Verwaltungsausgaben BASE	BASE EndlagerVIV & StandAG	41,6	45,1	54,4	67,3	64,2	63,3
Zwischenlagerung	EntsorgÜG	415,7	413,9	353,8	430,6	520,3	548,8
Summe Nicht-Refinanzierbare Ausgaben		276,4	244,7	233,4	267,9	296,2	317,5
Summe Refinanzierbare Ausgaben		878,7	824,2	812,4	963,4	1044,3	1041,6
Gesamtausgaben		1146,1	1068,9	1045,8	1231,3	1340,5	1359,1

8 Herausforderungen

Die Verwendung von hochradioaktiven Ressourcen ist seit dem 20. Jahrhundert mit einigen Herausforderungen und damit einhergehenden Problematiken verbunden. Ein Thema rückte in den letzten Jahren immer mehr in den Vordergrund: die Endlagerung der radioaktiven Abfälle. Da bislang keine Auswahl des Standortes vorgenommen wurde, wurde die vermeintlich temporäre Lösung der Zwischenlagerung etabliert.

Auch diese geht mit einigen Herausforderungen, wegen der Verzögerung der Findung eines geeigneten Endlagerstandortes, einher. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Beleuchtung dieser Herausforderungen – unterteilt nach gesellschaftlichen, organisatorischen und technischen Herausforderungen.

9 Gesellschaftliche Herausforderungen

Die sozialen Herausforderungen der Zwischenlagerung von Atommüll stehen in direktem Zusammenhang mit dem langanhaltenden Misstrauen der Bevölkerung gegenüber dem Betrieb der Zwischenlager. Diese Skepsis, die sich durch die Vielzahl von Konflikten und Bedenken entwickelt hat, prägt bis heute die öffentliche Wahrnehmung und den gesellschaftlichen Diskurs.

Die Herausforderung besteht zum einen darin, eine Verbindung zwischen der Bevölkerung und der Zwischenlagerung zu schaffen, sodass es keine Widerstände gibt, sondern eher eine Akzeptanz und Toleranz in der jeweiligen Region herrscht. Das Interesse an den Entwicklungen der Zwischenlagerung soll steigen und einen konstruktiven Diskurs herbeirufen, welcher zu gemeinsamen Lösungsfindung führt. Das Misstrauen und die verhaltene Akzeptanz gegenüber nuklearer Anlagen basieren vor allem auf der Betrachtung von Fehlern in Verbindung mit Unfällen, Katastrophen und technischen Problemen aus der Vergangenheit, die auch im selben Zuge auf die Atommüllentsorgung übertragen werden (Brohmann, Brunnengräber, und Hocke 2021).

Offizielle Stellen bemühen sich zunehmend die Transparenz zu verbessern und die Öffentlichkeit aktiv zu informieren. Es werden regelmäßige Standortveranstaltungen angeboten, bei denen BürgerInnen sich beteiligen und Fragen stellen können. Nichtsdestotrotz ist die dauerhafte Beteiligungen der Gesellschaft nicht gewährleistet. Die Herausforderung besteht darin, ein Generationsbewusstsein zu schaffen, das über viele Jahrzehnte anhält. Die Fluktuationen bei den AkteurInnen sind ausschlaggebend für den Wissenstransfer (Brunnengräber 2016). Ein Wissens- und Erfahrungsvakuum erschwert es, den Beteiligungsprozess konsistent aufrechtzuerhalten und alle Betroffenen auf Augenhöhe einzubeziehen.

Auch unter den verschiedenen beteiligten AkteurInnen, wie den Gemeinden an den Standort-Zwischenlagern, den Bürgerinitiativen (BI) und der BGZ, gibt es unterschiedliche Ansichten und Diskussionsschwerpunkte. Einige der Gemeinden verlangen einen finanziellen Ausgleich für die Lagerung von HAW an ihren Standorten. Die BI hingegen sorgen sich um die Sicherung und Sicherheit der Anlagen in der Zukunft und interessieren sich nicht für die Auseinandersetzung um eine Kompensation³⁸. Die BGZ garantiert im Gegensatz dazu die Sicherheit und bezeichnet die Zwischenlager als die mitunter bestgesicherten Anlagen Deutschlands. Es werden viele Messungen des Strahlungsausstritts durchgeführt und es existieren Forschungen zur Alterung der Behälter³⁹.

³⁸ <https://www.bi-luechow-dannenberg.de/2024/08/05/zwischenlagerdebatte-geld-statt-sicherheit/>

³⁹ <https://bgz.de/2018/03/09/neu-fragen-und-antworten-zur-sicheren-zwischenlagerung/>

Die sozialen Herausforderungen der Zwischenlagerung sind vielfältig und komplex. Die Bedenken und Ängste der Bevölkerung stehen im Mittelpunkt des gesellschaftlichen Diskurses, und trotz der Bemühungen bleibt das Vertrauen in den Prozess oftmals brüchig. Es wird entscheidend sein, langfristig tragfähige Beteiligungsmodelle zu entwickeln, die nicht nur auf Informationsveranstaltungen und Dialogformaten beruhen, sondern die Bevölkerung wirklich in den Entscheidungsprozess integrieren.

10 Organisatorische Herausforderungen

Die organisatorischen Herausforderungen sind ein äußerst wichtiger Bestandteil der öffentlichen Diskussionen.

Einer der drängendsten Herausforderungen stellen im Zuge der Verzögerung des Standortauswahlprozesses die auslaufenden Genehmigungen der Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle dar. Die meisten Zwischenlager müssen bereits in den nächsten 10 bis 20 Jahren neue Genehmigungen beantragen (siehe Kapitel 5).

Der Prozess der Wiedergenehmigung der Aufbewahrung nimmt viele Jahre in Anspruch. Ein Beispiel ist das Zwischenlager in Ahaus, wo die BGZ bereits aktiv an der Wiedergenehmigung der Lagerung von hochradioaktiven Abfällen arbeitet und sich in einem fortgeschrittenen Stadium befindet. Die Lagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen wurde bis zum Jahre 2057 verlängert (siehe Kapitel 5.1). Die Lagerung von hochradioaktiven Abfällen wurde bislang noch nicht verlängert, muss aber bei einigen Zwischenlagern schon in den nächsten 10 Jahren beantragt werden (siehe Kapitel 5). Doch wenn zahlreiche Zwischenlager gleichzeitig eine neue Genehmigung benötigen, könnten bürokratische Herausforderungen diese Genehmigungsbeschaffungen erheblich verzögern. Die unvorhersehbare Dauer der Lagerung radioaktiver Abfälle stellt ebenfalls eine große Herausforderung dar. Eine herkömmliche Verlängerung der Genehmigungen beläuft sich auf 40 Jahre, doch die Entsorgungskommission (ESK) geht davon aus, dass allein 80 Jahre nicht ausreichen werden, um die Abfälle aus den Zwischenlagern in ein bereits erbautes und vorbereitetes Endlager zu transferieren. Angesichts der Komplexität und Langwierigkeit der Endlagersuche wird angenommen, dass die Zwischenlagerung noch viele Jahrzehnte, wenn nicht gar Jahrhunderte, in Anspruch nehmen wird (Becker 2023).

Ein weiterer kritischer Punkt ist der An- und Abtransport der Abfallbehälter, der ebenfalls mit einigen Genehmigungsverfahren einhergeht. Die Gewährleistung eines kontrollierten und risikofreien Transports ist mit großen Mühen verbunden und essenziell für die Sicherheit der Bevölkerung. Jährlich werden in Deutschland mehr als eine halbe Million Versandstücke mit radioaktiven Stoffen transportiert, wobei der größte Anteil im Bereich der radioaktiven Stoffe für Mess-, Forschungs- und medizinische Zwecke liegt. Die Sicherheit beim Transport erfolgt über das Versandstück selbst und wird daher im Rahmen des Gefahrgutrechts durch das

BASE geprüft, das für die Erteilung der Bauart-Zulassungen und Transportbehälter zuständig ist. Die Sicherheit des Versandstücks basiert auf den Empfehlungen der IAEA und muss die Sicherheitsfunktionen hinsichtlich des Einschlusses des radioaktiven Inhalts, der Begrenzung der äußeren Dosisleistung, der Ableitung der vom Inhalt ausgehenden Wärme und der Verhinderung des Entstehens einer nuklearen Kettenreaktion erfüllen.⁴⁰

Ein weiterer bedeutender Aspekt ist die zukünftige Finanzierung der Zwischenlagerung. Der KENFO (siehe Kapitel 3.1.8.1 und 3.3) wird in absehbarer Zeit nicht mehr für die Begleichung der Kosten aufkommen können. Dies bedeutet, dass die SteuerzahlerInnen über Generationen hinweg die finanziellen Lasten tragen müssen (Wimmers, Göke, u. a. 2023).

Zu guter Letzt wird der Mangel an einer Heißen Zelle (siehe Kapitel 2.1.12) als Herausforderung angesehen. Aufgrund des Fehlens besteht die Sorge, dass eine Überprüfung des Inhaltes nicht vorgenommen werden kann und man dadurch auch nicht eingreifen kann, wenn es einen Schaden geben sollte (Neumann 2015).

11 Technische Herausforderungen

Die Zwischenlagerung von radioaktivem Abfall birgt auch diverse technische Herausforderungen, wie den Umgang mit der entstehenden Abwärme, den Strahlenschutz, die Logistik und den Schutz vor Externalitäten.

11.1 Abwärme

Alle Zwischenlager in Deutschland sind als Trockenlager konzipiert, die mit einer passiven Naturzugkühlung ausgestattet sind (BASE 2023b). Dieses Kühlungssystem basiert auf dem thermischen Auftrieb – die warme Luft steigt auf, während die kühle Luft absinkt. So wird die warme Luft nach oben, über die Belüftungsöffnungen, aus dem Gebäude geleitet.

Da die bestrahlten und eingelagerten Brennelemente weiterhin eine erhebliche Menge an Wärme freisetzen (siehe Abbildung 5), verfügen die Zwischenlager über ein von der Technik unabhängiges System, das auch im Falle eines Stromausfalls oder anderer technischer Störungen die Wärmeabfuhr sicherstellt.⁴¹

Während der genehmigten 40 Jahre der trockenen Zwischenlagerung sinkt die Wärmeleistung auf ein Drittel und die Aktivität auf ein Viertel der Werte, die sie zu Beginn der trockenen Zwischenlagerung hatten (Pönitz 2017).

⁴⁰ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/transporte/einfuehrung/einfuehrung.html>

⁴¹ https://www.base.bund.de/de/nukleare-sicherheit/sicherheit/vorsorge-notfall-massnahmen/stromausfall/stromausfall_inhalt.html

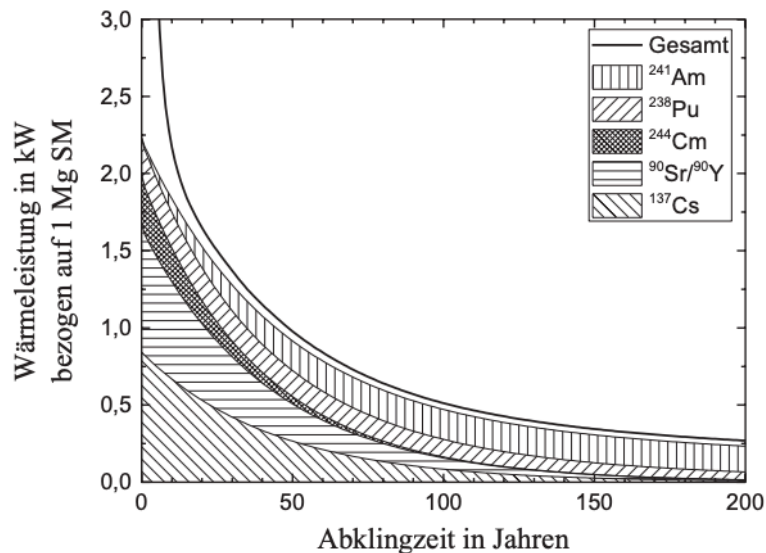


Abbildung 6: Änderung der Wärmeleistung von bestrahltem UO₂-Brennstoff (Pönitz 2017, 37)

11.2 Strahlenschutz

Gemäß §8 StrlSchG ist jede unnötige Exposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden. Auch unterhalb der Grenzwerte sind die Exposition und Kontamination unter Berücksichtigung aller Umstände und unter Beachtung des Stands von Wissenschaft und Technik so gering wie möglich zu halten.

Den Schutz vor ionisierender Strahlung bieten die Behälter, in denen die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Zudem leistet auch das Gebäude einen Schutz zur Abschirmung der Strahlung (BASE 2023b).

Die Zwischenlager sind gemäß § 56 StrlSchV dazu verpflichtet, verschiedene Messungen zur Strahlenüberwachung durchzuführen. Hierzu zählen die Messung der Raumluft in Arbeitsbereichen, der Ortsdosis bzw. der Ortsdosisleistung bei Belegungsänderungen und auch in regelmäßigen Abständen die Prüfung der Verkehrsflächen und die Messung der Körperdosis von Personen, die sich im Strahlenschutzbereich aufhalten.

11.3 Schutz vor Externa

Neben der Sicherheit spielt auch die Sicherung eine wesentliche Rolle (siehe Kapitel 2.1.11). Die Prüfziele hierbei sind die Verhinderung der Entwendung der aufzubewahrenden Kernbrennstoffe, sowie die Verhinderung einer erheblichen Freisetzung von Kernbrennstoffen in der Anlage und nach einer Entwendung und Transportation an einen anderen Ort.

Das Eintreten von verschiedenen Zwischenfällen, wie der Beeinträchtigung der IT-Sicherheit oder ein gezielter Flugzeugabsturz, müssen bei dem Konzept der Zwischenlager eingehalten und durch entsprechende Sicherheitskonzepte nachgewiesen werden.

Um die Sicherheit der Zwischenlager zu gewährleisten, werden detaillierte Informationen zu den Sicherheits- und Sicherungskonzepten nicht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.⁴²

12 Zwischenlager in Deutschland

In Deutschland existieren insgesamt 17 Zwischenlagerstandorte, die von der BGZ betrieben werden. Sie sind in zentrale und dezentrale Lager unterteilt und in drei unterschiedlichen Bauweisen errichtet.⁴³ Die Zwischenlager in Jülich und Lubmin werden von der EWN-Gruppe betrieben (Wimmers, Bärenbold, u. a. 2023).

In Jülich dürfen die Brennelemente nur auf Grundlage einer Anordnung der zuständigen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde aufbewahrt werden.⁴⁴ Durch eine fehlende Umsetzbarkeit neuer Auflagen für die Zwischenlager am Standort Lubmin hat die EWN GmbH einen Neubau beantragt,⁴⁵ das Brennelemente-Zwischenlager ESTRAL, dessen Genehmigung jedoch noch aussteht.⁴⁶

Zusätzlich zu den genannten Zwischenlagerstandorten existieren weitere Ländersammelstellen, an denen nur schwach- und mittelradioaktive Abfälle gelagert werden. Die Standorte der Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager, sowie der Landessammelstellen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Im STEAG-Konzept wurden die Zwischenlager in Norddeutschland, an den Standorten Brokdorf, Brunsbüttel, Grohnde, Krümmel, Lingen und Unterweser, in Form eines einschiffigen Gebäudes mit einer Wandstärke von ca. 1,2 Metern errichtet.

In Süddeutschland wurde mit dem WIT-Konzept eine Hallenbauweise, an den Standorten Biblis, Grafenrheinfeld, Gundremmingen, Isar und Philippsburg, in Form eines zweisechiffigen Gebäudes mit einer Wandstärke von ca. 0,85 Metern realisiert. Diese Konstruktionsweise basiert hierbei auf dem Konzept der Zwischenlager in Ahaus und Gorleben. Auch das Zwischenlager Nord bei Lubmin orientiert sich an dieser Bauweise.

Das Tunnel-Konzept repräsentiert die dritte Bauweise, die eine unterirdische Lagerung darstellt, wie sie aufgrund der besonderen Beschaffenheit des Standorts in einem ehemaligen Steinbruch bisher nur am Standort Neckarwestheim umgesetzt wurde (Camurdas u. a. 2023).⁴⁷

⁴² https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/sicherheit_sicherung/sicherheit-bewertung_node.html;jsessionid=D075742C015EFD741274ED1EA725E8A1.internet981 (letzter Zugriff: 30.07.2024)

⁴³ https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/bauweise_zwl/bauweise-zwl_node.html (letzter Zugriff: 14.07.2024)

⁴⁴ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/kkj.html> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

⁴⁵ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zln.html> (letzter Zugriff: 29.07.2024)

⁴⁶ Die Genehmigung durch das BASE wird frühestens im Frühjahr 2026 erwartet, siehe <https://www.ewn-gmbh.de/projekte/estral/faqs/>.

⁴⁷ https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/bauweise_zwl/bauweise-zwl_node.html (letzter Zugriff: 14.07.2024)

Aufgrund überlappender Zuständigkeiten gibt es für die Zwischenlager teilweise mehrere Genehmigungs- oder Aufsichtsbehörden. Dies kann der Fall sein, wenn sowohl Brennelemente als auch schwach- und mittelradioaktive Abfälle an einem Standort gelagert werden. Das BASE hat die Aufsicht über die Endlagerung, Zwischenlagerung und den Transport von HAW (siehe Kapitel 3.2.3).⁴⁸ Die Landesbehörden sind für die Aufsicht über die Stilllegung der Kernkraftwerke und der Zwischenlager für radioaktive Abfälle, sowie die Lagerung von LAW und MAW zuständig (siehe Kapitel 3.2.5) (BASE 2020).

Die atomrechtliche Aufsicht liegt bei den jeweiligen Landesbehörden und beinhaltet unter anderem die Überwachung der Einhaltung der Vorschriften und Bestimmungen des AtG und die Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen sicherheitstechnisch relevanter Anlagenteile.⁴⁹

Im Folgenden sind die wichtigsten Zwischenlager näher beschrieben. Zu ihnen zählen die Lager unter der Aufsicht der BGZ, das Brennelemente-Lager Jülich und das Zwischenlager Nord bei Lubmin. Zusätzlich dazu werden die Sammelstellen der Bundesländer (Landessammelstellen) und andere Lagerstandorte vorgestellt. Der Begriff der „16 Zwischenlagerstandorte“ bezieht sich nur auf die Brennelemente-Zwischenlager. Daher gehören die Standorte Obrigheim, Stade und Würgassen nicht mit zu dieser Auflistung – werden im Folgenden dennoch betrachtet. Es existieren auch Angaben zu 17 Zwischenlagerstandorten, diese beziehen das Zwischenlager Obrigheim, trotz fehlendem Brennelemente-Lager, mit ein, da es einen Antrag für ein solches Lager gestellt, dann aber wieder zurückgezogen hat.

⁴⁸ https://www.base.bund.de/de/base/bundesamt/bundesamt_inhalt.html

⁴⁹ <https://www.nuklearesicherheit.de/genehmigungs-und-aufsichtssystem/aufsichtssystem/aufgaben/>

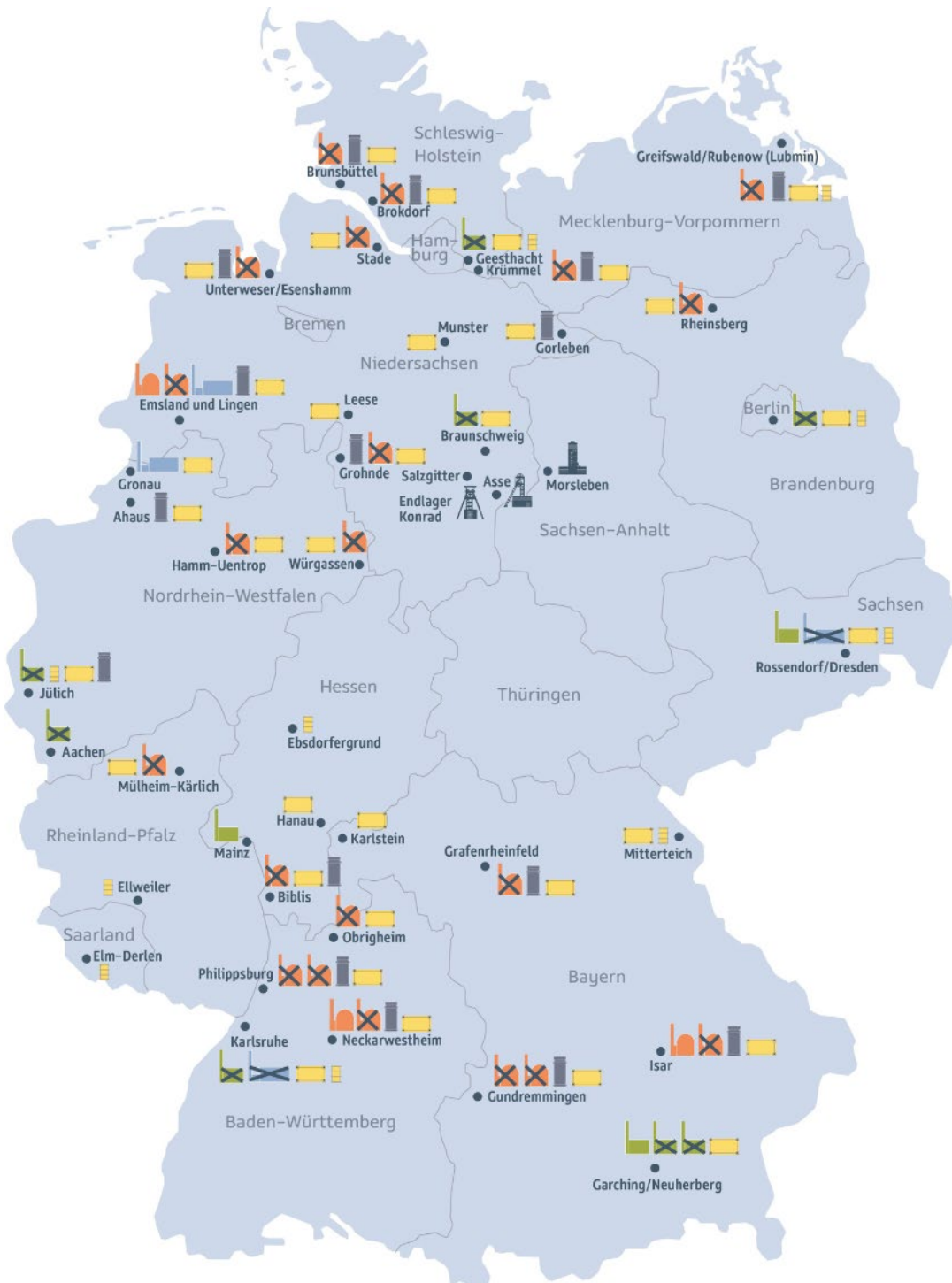


Abbildung 7: Standorte der Brennelemente-Zwischenlager, Abfall-Zwischenlager und Landessammelstellen in der BRD (BMUV 2023, 20, Abb. 5.1)

12.1 Ahaus

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{50 51 52} (BASE 2023b).

- **Standort:** Ahaus, westliches Münsterland, Nordrhein-Westfalen
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE | Bezirksregierung Münster
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 420 (mehrere Behälter pro Stellplatz zugelassen)
- **Belegte Behälterstellplätze:** 329 (Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA)) | 340 (Abfall-Zwischenlager Ahaus (AZA))
- **Eingelagerte Behälter:** 6 CASTOR-V-Behälter mit verbrauchten Brennelementen aus deutschen Atomkraftwerken | 305 CASTOR THTR/AVR-Behälter mit bestrahlten Brennelementen aus dem Thorium-Hochtemperatur-Reaktor (THTR) in Hamm-Uentrop | 18 CASTOR MTR 2-Behälter mit Brennelementen aus dem Forschungsreaktor Dresden-Rossendorf | schwach- und mittelfradioaktive Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung deutscher Kernkraftwerke
- **Genehmigtes Inventar:** max. 3.960 t SM | max. 17 MW
- **Inbetriebnahme:** März 1992 (BZA) | 2010 (AZA)
- **Genehmigt bis:** 2036 (BZA) | 2057 (AZA, im Juli 2020 für LAW verlängert)
- **Bauweise:** WTI-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** zentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 85 m x 38 m x 19 m (AZA)
- **Besonderheit:** das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) betreibt ein eigenes, von der BGZ unabhängiges Strahlungsmesssystem rund um die Anlage

12.2 Biblis

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{53 54}.

- **Standort:** Biblis, Hessen

⁵⁰ <https://zwischenlager.info/standort/ahaus/> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

⁵¹ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/ahaus.html> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

⁵² <https://zwischenlager.info/#toggle-id-1> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

⁵³ <https://zwischenlager.info/standort/biblis/> (letzter Zugriff: 14.07.2024)

⁵⁴ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-biblis.html> (letzter Zugriff: 14.07.2024)

- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE | Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 135
- **Belegte Behälterstellplätze:** 108
- **Eingelagerte Behälter:** 102 CASTOR V/19 | 6 CASTOR HAW28M | 138 MOSAIK
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1.400 t SM | max. 5,3 MW
- **Inbetriebnahme:** 15. Mai 2006
- **Genehmigung bis:** 2046
- **Bauweise:** WIT-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 92 m x 38 m x 19,5 m
- **Besonderheit:** vorbereitet für Aufnahme von Wiederaufbereitungsabfällen aus dem Ausland: 20 Behälter aus Großbritannien | 4 Behälter aus Frankreich

12.3 Brokdorf

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{55 56}.

- **Standort:** Schleswig-Holstein, in der Nähe von Glückstadt an der Elbe
- **Betreiber:** BGZ (ehem. PreussenElektra GmbH)
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Schleswig-Holsteinisches Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 100
- **Belegte Behälterstellplätze:** 60⁵⁷
- **Eingelagerte Behälter:** 60 CASTOR V/19-Behälter
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1.000 t SM | max. 3,4 MW
- **Inbetriebnahme:** 5. März 2007
- **Genehmigt bis:** 2047
- **Bauweise:** STEAG-Konzept

⁵⁵ <https://zwischenlager.info/#toggle-id-3> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

⁵⁶ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-brokdorf.html> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

⁵⁷ Die Webseiten des BASE und der BGZ geben unterschiedliche Informationen an. Laut BASE lagern dort 57 Behälter (Stand 08.10.2024) und laut BGZ 60 Behälter (Stand 30.09.2024).

- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 93 m x 27 m x 23 m
- **Besonderheit:** Kurze Entfernung zum ehemaligen Reaktorgebäude | Minimierung der Nutzung öffentlicher Verkehrswege | Aufnahme von Wiederaufarbeitungsabfällen aus dem Ausland geplant

12.4 Brunsbüttel

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{58 59}.

- **Standort:** Brunsbüttel, Schleswig-Holstein
- **Betreiber:** Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH und Co. oHG
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 24 beantragt
- **Belegte Behälterstellplätze:** 20
- **Eingelagerte Behälter:** 20 CASTOR V/52
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1.600 t SM | max. 6 MW
- **Inbetriebnahme:** 2006
- **Genehmigung bis:** aktuell keine gültige Aufbewahrungsgenehmigung
- **Bauweise:** STEAG-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 145 m x 30 m x 21 m
- **Besonderheit:** seit 2020 stillgelegt

Das Zwischenlager Brunsbüttel liegt in Schleswig-Holstein und wurde bereits im Jahre 2006 in Betrieb genommen. Die Genehmigungsverfahren für diesen Standort laufen noch. Die damalige Genehmigung wurde im Jahr 2015 infolge eines Beschlusses des Bundesverwaltungsgerichts unwirksam⁶⁰.

Als Grund für die Aufhebung ist auszuführen, dass das BfS im Genehmigungsverfahren den Sicherheitsaspekt nicht korrekt beleuchtet hatte, weswegen die Nachvollziehbarkeit für das Gericht nicht gewährleistet war. Laut eigenen Aussagen der Behörde wurden alle notwendigen

⁵⁸ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-brunsbuettel.html> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁵⁹ <https://zwischenlager.info/standorte-schleswig-holstein-brunsbuettel/> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁶⁰ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-brunsbuettel.html> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

Maßnahmen getroffen⁶¹. Aus der rechtlichen Perspektive ist auch die BGZ dem Genehmigungsverfahren beigetreten und begleitet nun dieses⁶².

Das Abfall-Zwischenlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, in dem diese Abfälle bis zur Einlagerung im Schacht Konrad gelagert werden sollen, wurde im Jahr 2024 in Betrieb genommen.⁶³

12.5 Gorleben

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{64 65} (BASE 2023b).

- **Standort:** Gorleben, Niedersachsen
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz Niedersachsen
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 420
- **Belegte Behälterstellplätze:** 113
- **Eingelagerte Behälter:** 3 CASTOR V/19 | 1 CASTOR Ic | 1 CASTOR IIa | 74 CASTOR HAW 20/28 CG | 21 CASTOR HAW28M | 12 TN 85 | 1 TS 28 V
- **Genehmigtes Inventar:** max. 3.800 t SM | max. 16 MW
- **Inbetriebnahme:** 1995
- **Genehmigt bis:** 2034
- **Bauweise:** WTI-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** zentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 90 m x 75 m x 6 m
- **Besonderheit:** Gorleben im September 2020 endgültig als Endlager-Standort ausgeschlossen

⁶¹ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-brunsbuettel-atomrechtliche-situation.html;jsessionid=F2C37884140BBC9C4CC1C86A075DC554.internet952> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁶² <https://zwischenlager.info/#toggle-id-17> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁶³ <https://zwischenlager.info/standort/brunsbuettel/> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

⁶⁴ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-gorleben.html> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

⁶⁵ <https://zwischenlager.info/#toggle-id-5> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

12.6 Grafenrheinfeld

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{66 67}.

- **Standort:** Grafenrheinfeld, Bayern
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 40 in Lagerbereich 1 | 48 in Lagerbereich 2
- **Belegte Behälterstellplätze:** 54
- **Eingelagerte Behälter:** 54 CASTOR V/19
- **Genehmigtes Inventar:** max. 800 t SM | max. 3 MW
- **Inbetriebnahme:** 27. Februar 2006
- **Genehmigung bis:** 2046
- **Bauweise:** WIT-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 28 m x 101 m x 17 m

12.7 Grohnde

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{68 69}.

- **Standort:** Emmerthal, Niedersachsen
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 100
- **Belegte Behälterstellplätze:** 63⁷⁰
- **Eingelagerte Behälter:** 59 CASTOR V/19
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1.000 t SM | max. 3,75 MW

⁶⁶ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-grafenrheinfeld.html> (letzter Zugriff: 14.07.2024)

⁶⁷ <https://zwischenlager.info/standort/grafenrheinfeld/> (letzter Zugriff: 14.07.2024)

⁶⁸ <https://zwischenlager.info/standort/grohnde/> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

⁶⁹ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-grohnde.html> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

⁷⁰ Die Angaben des BASE und der BGZ unterscheiden sich. Laut BGZ lagern 63 Behälter am Standort (Stand 30.09.2024), laut BASE sind lediglich 56 Behälterstellplätze belegt (Stand 28.05.2024).

- **Inbetriebnahme:** 27. April 2006
- **Genehmigung bis:** 2046
- **Bauweise:** STEAG-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 93 m x 27 m x 23 m

12.8 Gundremmingen

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{71 72}.

- **Standort:** Günzburg, Bayern
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 192
- **Belegte Behälterstellplätze:** 127⁷³
- **Eingelagerte Behälter:** 127 CASTOR V/52
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1850 t SM | max. 6 MW
- **Inbetriebnahme:** 25. August 2006
- **Genehmigung bis:** 2046
- **Bauweise:** STEAG-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 104 m x 38 m x 18 m

12.9 Isar

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{74 75}.

- **Standort:** Niederbayern, Bayern
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE

⁷¹ <https://zwischenlager.info/standort/gundremmingen/> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

⁷² <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-gundremmingen.html> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

⁷³ Die Angaben des BASE und der BGZ unterscheiden sich. Laut BGZ lagern 130 Behälter am Standort (Stand 30.09.2024), laut BASE sind lediglich 127 Behälterstellplätze belegt (Stand 26.02.2024).

⁷⁴ <https://zwischenlager.info/standort/isar/> (letzter Zugriff: 29.06.2024)

⁷⁵ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-isar.html> (letzter Zugriff: 15.07.2024)

- **Atomrechtliche Aufsicht:** Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 152
- **Belegte Behälterstellplätze:** 88
- **Eingelagerte Behälter:** 26 CASTOR V/19 | 43 CASTOR V/52 | 19 Typ TN 24 E
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1.500 t SM | max. 6 MW
- **Inbetriebnahme:** 12. März 2007
- **Genehmigung bis:** 2047
- **Bauweise:** WTI-Konzept Bauweise
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 92 m x 38 m x 18 m

12.10 Jülich

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen des BASE⁷⁶ (BASE 2023b).

- **Standort:** Nordrhein-Westfalen
- **Betreiber:** JEN
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 158
- **Belegte Behälterstellplätze:** 152
- **Eingelagerte Behälter:** 152 Behälter CASTOR AVR/THTR
- **Genehmigtes Inventar:** 225 kg Kernbrennstoff
- **Inbetriebnahme:** August 1993
- **Genehmigung bis:** Aktuell keine Aufbewahrungsgenehmigung | die Aufbewahrung erfolgt auf Basis einer aufsichtlichen Anordnung
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente-Zwischenlager
- **Besonderheit:** Genehmigung 2013 ausgelaufen | rechtliche Grundlage für Aufbewahrung der Brennelement-Kugeln ist derzeit eine Anordnung der zuständigen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde

⁷⁶ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/kkj.html> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

12.11 Krümmel

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{77 78} (BGZ 2024).

- **Standort:** Krümmel, Schleswig-Holstein
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur Schleswig-Holstein
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 65
- **Belegte Behälterstellplätze:** 42
- **Eingelagerte Behälter:** 42 CASTOR V/52
- **Genehmigtes Inventar:** max. 775 t SM | max. 3 MW
- **Inbetriebnahme:** 14. November 2006
- **Genehmigung bis:** 2046
- **Bauweise:** STEAG-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente-Zwischenlager (Bau Abfall-Zwischenlager noch nicht abgeschlossen)
- **Maße des Lagergebäudes:** 88,0 m x ca. 26,8 m x ca. 23,0 m
- **Besonderheit:** liegt am nördlichen Ufer der Elbe

12.12 Lingen

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen des BASE⁷⁹ (BASE 2023b).

- **Standort:** Lingen, Niedersachsen
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 125
- **Belegte Behälterstellplätze:** 47
- **Eingelagerte Behälter:** 47 CASTOR V/19
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1.250 t SM | max. 4,7 MW

⁷⁷ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-kruemmel.html> (letzter Zugriff: 15.07.2024)

⁷⁸ <https://zwischenlager.info/standort/kruemmel/> (letzter Zugriff: 29.06.2024)

⁷⁹ https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/bauweise_zwl/bauweise-zwl_node.html (letzter Zugriff: 24.10.2024)

- **Inbetriebnahme:** 10. Dezember 2002
- **Genehmigung bis:** 2042
- **Bauweise:** STEAG-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 110 m x 26 m x 20 m
- **Besonderheit:** ausschließliche Lagerung von hochradioaktiven Abfällen des Atomkraftwerks

12.13 Lubmin (Zwischenlager Nord)

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen des BASE und des BMUV⁸⁰ (BMUV 2023).

- **Standort:** Vorpommern-Greifswald, Mecklenburg-Vorpommern
- **Betreiber:** EWN
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 80
- **Belegte Behälterstellplätze:** 74
- **Eingelagerte Behälter:** 62 CASTOR 440/84 | 3 CASTOR KRB MOX | 4 CASTOR KNK | 5 CASTOR HAW 20/28 CG
- **Inbetriebnahme:** 1999
- **Genehmigung bis:** 2039
- **Bauweise:** WTI-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 241 m x 166 m x 18 m (Abfall-Zwischenlager) | 198 m x 18 m x 18 m (Brennelemente-Zwischenlager) | 130 m x 54 m x 24 m (geplanter Neubau)
- **Besonderheit:** Einlagerung von Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe sowie Brennstäbe aus dem ehemaligen Kernforschungszentrum Karlsruhe und dem nuklearbetriebenen Forschungsschiff "Otto Hahn" | Antrag auf Genehmigung eines Neubaus (sog. ESTRAL) zur Aufbewahrung der Kernbrennstoffe mit 74 Stellplätzen wurde 2019 gestellt | Lagerkapazität für die staatliche Verwahrung von Kernbrennstoffen wird vorgehalten

⁸⁰ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zln.html> (letzter Zugriff: 29.07.2024)

12.14 Neckarwestheim

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen des BASE^{81 82} (BASE 2023b).

- **Standort:** Neckarwestheim, Baden-Württemberg
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 151
- **Belegte Behälterstellplätze:** 99
- **Eingelagerte Behälter:** 70 CASTOR V/19 | 14 TN 24 E | 15 CASTOR 440/84 mvK
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1600 t SM | max. 3,5 MW
- **Inbetriebnahme:** 6. Dezember 2006
- **Genehmigung bis:** 2046
- **Bauweise:** Tunnel-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 90 m x 14 m x 17 m (Tunnel 1) | 84 m x 14 m x 17 m (Tunnel 2) | 133 m x 30 m x 21 m (Abfall-Zwischenlager)
- **Besonderheit:** unterirdisches Brennelemente-Lager in altem Steinbruch | oberirdisches Abfall-Zwischenlager

12.15 Obrigheim

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ, dem BMUV und des BASE^{83 84} (BMUV 2023).

- **Standort:** Obrigheim, Baden-Württemberg
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- **Eingelagerte Behälter:** 459 Fässer mit konditionierten Abfallprodukten | 315 Endlagergebinde
- **Inbetriebnahme:** 2008

⁸¹ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-neckarwestheim.html> (letzter Zugriff: 15.07.2024)

⁸² <https://zwischenlager.info/standort/neckarwestheim/> (letzter Zugriff: 25.06.2024)

⁸³ <https://zwischenlager.info/standort/obrigheim/> (letzter Zugriff: 25.06.2024)

⁸⁴ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/kwo.html> (letzter Zugriff: 02.08.2024)

- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 57m x 28m x 8m
- **Besonderheiten:** nur Lagerung von LAW und MAW, die HAW wurden 2017 in 15 Transport-/ Lagerbehältern in das Zwischenlager Neckarwestheim transportiert | Antrag für Genehmigung eines Brennelemente-Lagers wurde 2018 zurückgezogen

12.16 Philippsburg

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{85 86}.

- **Standort:** Philippsburg, Baden-Württemberg
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 152
- **Belegte Behälterstellplätze:** 102
- **Eingelagerte Behälter:** 73 CASTOR V/19 | 29 CASTOR V/52
- **Genehmigtes Inventar:** max. 1.600 t SM | max. 6 MW
- **Inbetriebnahme:** 19. März 2007
- **Genehmigung bis:** 2047
- **Bauweise:** WTI-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 145 m x 30 m x 21 m (Abfall-Zwischenlager)
- **Besonderheit:** ist seit 2020 stillgelegt | Übereinkunft zwischen Frankreich und Deutschland über die Rückführung von 4 CASTOR-Behältern aus der Wiederaufarbeitung im Ausland

Der Hintergrund der Wiederaufbereitungsabfälle ist, dass während des Betriebes von Philippsburg, 165 Behälter mit Brennelementen in die Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague transportiert wurden. Ursprünglich waren es fünf, die wieder nach Philippsburg überbracht werden sollten – die restlichen 152 Behälter mit hochdruckkompaktierten mittelfradioaktiven metallischen Abfällen sollten nach Ahaus transportiert werden.

Das Vorhaben ist an der nichtzeitgerechten Bereitstellung der vorgesehenen TGC27 Behälter gescheitert, weswegen nun erneute Genehmigungsverfahren mit Erweiterungen und

⁸⁵ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-philippsburg.html> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁸⁶ <https://zwischenlager.info/standort/philippsburg/> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

Anpassungen in die Wege geleitet wurden⁸⁷. Nun soll auch das Rückführungskonzept aus dem Jahre 2015 greifen. In dem Konzept ist vorgesehen, dass es eine ausgewogene Verteilung auf die Standorte Biblis, Brokdorf, Isar und Philippsburg geben soll. Diese Rückführung wurde in Hessen (Standort Biblis) bereits abgeschlossen. Weitere 18 CASTOR-Behälter müssen noch nach Deutschland⁸⁸.

12.17 Stade

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BMUV⁸⁹ (BMUV 2023).

- **Standort:** Stade, Niedersachsen
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz
- **Eingelagerte Behälter:** 235 Fässer mit konditionierten Abfallprodukten | 792 Endlagergebinde
- **Inbetriebnahme:** Juli 2007
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 66 m x 25 m x 13 m
- **Besonderheit:** Fokus auf schwach- und mittelradioaktive Abfälle

12.18 Unterweser

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ und des BASE^{90 91}.

- **Standort:** Landkreis Wesermarsch, Niedersachsen, westliches Ufer der Weser
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** BASE | Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz

⁸⁷ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-philippsburg.html> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁸⁸ <https://bgz.de/2023/07/25/zwischenlager-philippsburg-aufbewahrung-wiederaufarbeitungsabfaelle-genehmigt/> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁸⁹ <https://zwischenlager.info/standort/stade/> (letzter Zugriff: 04.07.2024)

⁹⁰ <https://zwischenlager.info/standort/unterweser/> (letzter Zugriff: 28.07.2024)

⁹¹ <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-unterweser.html> (letzter Zugriff: 30.07.2024)

- **Vorhandene Behälterstellplätze:** 80
- **Belegte Behälterstellplätze:** 40
- **Eingelagerte Behälter:** 40 CASTOR V/19
- **Genehmigtes Inventar:** max. 800 t SM | max. 3 MW
- **Inbetriebnahme:** 1981 (Abfall-Zwischenlager 1 (AZU 1)) | 2007 (Brennelemente-Zwischenlager) | 2020 (Abfall-Zwischenlager 2 (AZU 2))
- **Genehmigt bis:** 2047
- **Bauweise:** STEAG-Konzept
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Brennelemente- und Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 71 m x 29 m x 8 m (AZU 1) | 79 m x 28 m x 17 m (AZU 2)

12.19 Würgassen

Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf Veröffentlichungen der BGZ, des WDR und des BMUV⁹² (WDR 2023; BMUV 2023).

- **Standort:** Beverungen, Niedersachsen
- **Betreiber:** BGZ
- **Genehmigungsbehörde:** Bezirksregierung Detmold
- **Atomrechtliche Aufsicht:** Bezirksregierung Detmold
- **Eingelagerte Behälter:** 1.511 Fässer mit konditionierten Abfallprodukten | 386 Endlagergebinde
- **Inbetriebnahme:** 2007
- **Art des Zwischenlagers:** dezentrales Abfall-Zwischenlager
- **Maße des Lagergebäudes:** 40 m x 21 m x 10 m
- **Besonderheit:** Fokus auf schwach- und mittelfradioaktive Abfälle

12.20 Landessammelstellen

Neben den aufgeführten Zwischenlagerstandorten gibt es weitere Sammelstellen für radioaktive Abfälle. Bei der laufenden Stilllegung von Kernkraftwerken und Brennelementfertigungsanlagen, sowie der Nutzung von Forschungsreaktoren, fallen radioaktive Abfälle an. Diese werden an den Kraftwerks- bzw. Reaktorstandorten oder in Konditionierungseinrichtungen zwischengelagert und dann zu einer Sammelstelle transportiert. Diese Sammelstellen sind dann entweder Lager für Brennelemente oder für andere radioaktive Abfälle. Viele der Standorte sind nicht in der Hand der BGZ, sondern werden von Forschungseinrichtungen, Unternehmen, Landesämtern oder Bezirksregierungen

⁹² <https://zwischenlager.info/#toggle-id-16> (letzter Zugriff: 28.07.2024),
<https://zwischenlager.info/standort/wuergassen/> (letzter Zugriff: 24.10.2024)

betrieben. Einige der Bundesländer haben keine eigene Sammelstelle, sondern lagern ihre radioaktiven Abfälle in der Sammelstelle eines anderen Bundeslands. Beispielsweise werden die radioaktiven Abfälle der Landessammelstellen Hamburg, Bremen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein beim Helmholtz-Zentrum hereon GmbH in Geesthacht gelagert. In Münster gibt es eine zentrale Sammelstelle für radioaktive Abfälle der Bundeswehr, dessen Genehmigungsinhaber das Wehrwissenschaftliche Institut für Schutztechnologien ist. Und die Landessammelstelle Hessen wird vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie geleitet (BMUV 2023).

Die Zentralstelle für radioaktive Abfälle (ZRA) in Berlin ist ebenfalls eine Landessammelstelle mit einer Grundfläche von ca. 320 m² ⁹³. Sie gehört zum Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) und lagert LAW und MAW, die bei der Forschung und medizinischen Nutzung im Land Berlin anfallen, bis sie an ein Endlager abgegeben werden können⁹⁴.

12.21 Internationaler Vergleich

Im internationalen Vergleich zeigen sich vielfältige Konzepte und Technologien, die von den jeweiligen nationalen Gegebenheiten, gesetzlichen Rahmenbedingungen und technischen Möglichkeiten geprägt sind.

Mitte 2024 betreiben 32 Staaten weltweit 408 Kernreaktoren, dazu kommen 59 Neubauprojekte sowie über 200 stillgelegte Reaktoren, sodass insgesamt 39 Staaten mit den Herausforderungen von radioaktiven Abfällen konfrontiert sind (Schneider u. a. 2024).

Die Situation der verschiedenen Länder ist sehr ähnlich: durch fehlende Lager verschiebt sich die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle, die Zwischenlagerzeiten verlängert sich und die Lagerkapazitäten werden in einigen Ländern, wie beispielsweise der USA (Wegel u. a. 2019), knapp. Es gibt weltweite Diskussionen über die Sicherheit der Zwischenlager, mögliche Zwischenlagerzeiten von über 100 Jahren und darüber, welche Anlagen für eine Zwischenlagerung erforderlich sind. Die Lagerung der LAW und MAW steht vor ähnlichen Herausforderungen (Besnard u. a. 2019).

Es gibt weltweit zwei Arten der Zwischenlagerung: Nass- und Trockenlager (siehe Kapitel 2.1.7 und 2.1.8). Nasslager liegen hauptsächlich in Reaktornähe, aber in einigen Ländern wie Frankreich und Russland gibt es sie auch außerhalb der Kernkraftwerke (Besnard u. a. 2019). Auch die USA lagert den Großteil ihrer HAW in Nasslagern, in der Nähe ihrer Kernkraftwerke (Wegel u. a. 2019).

Für eine Nasslagerung sind viele Anlagen nötig, die für die Wasserzirkulation, das Ein- und Ausladen und die Überprüfung der Sicherheit zuständig sind. Alle diese Anlagen müssen

⁹³ https://www.helmholtz-berlin.de/projects/zra/zwischenlagerung_de.html (letzter Zugriff: 09.09.2024)

⁹⁴ https://www.helmholtz-berlin.de/projects/zra/index_de.html (letzter Zugriff: 09.09.2024)

ständig an Strom angeschlossen sein und sind dadurch sehr anfällig für Störungen, wie z.B. Stromausfälle (Besnard u. a. 2019).

Für die Trockenlager gibt es viele unterschiedliche Bauweisen. Sie können unterirdisch (siehe Kapitel 5.14), in einem Lagergebäude, oder wie in der USA, auf freien Feldern gelegen sein (Wegel u. a. 2019). Jede dieser Arten von Zwischenlagern haben unterschiedliche Probleme: die Container und Behälter sind auf dem freien Feld der Witterung ausgesetzt und haben keinen zusätzlichen Schutz vor SEWD. Die Lager in Gebäuden oder unter der Erde müssen dafür eine Luftzirkulation sicherstellen – welche auch durch ein stromabhängiges Ventilationssystem erfolgen kann.

Auch bei der Art der Lagerbehälter gibt es in den Ländern Unterschiede. Es gibt wie in Deutschland und der Schweiz Transport- und Lagerbehälter, die eine doppelte Nutzungsmöglichkeit haben, jedoch existieren auch einfache Betonbehälter, die nur für die Lagerung konzipiert wurden. Diese kommen hauptsächlich in den USA zum Einsatz (Besnard u. a. 2019).

Auch die Finanzierung der Zwischenlagerung und des Rückbaus der Kernkraftwerke variieren zwischen den Ländern. In Belgien ist sie durch zwei Mechanismen finanziert: es gibt, ebenso wie in Deutschland, einen Fonds für die langfristige Verwaltung der radioaktiven Abfälle, für den Rückbau der Kernkraftwerke ist jedoch Synatom, ein Tochterunternehmen einer Kernenergieproduzentin (Engie Electrabel S.A.), zuständig (Brunnengräber u. a. 2015).

In der Schweiz existieren hingegen zwei getrennte Fonds für den Rückbau der kerntechnischen Anlagen und für die Lagerung der radioaktiven Abfälle. Die Berechnung dieser Kosten erfolgte aber nur für eine Betriebsdauer von 50 Jahren (Besnard u. a. 2019). In den Ländern gilt jedoch allgemein, dass die Abfallverursacher für die Kosten des Rückbaus und der Zwischen- und Endlagerung verantwortlich sind (Brunnengräber u. a. 2015).

Die Länder gehen auch mit der Öffentlichkeitsarbeit unterschiedlich um. Einige von ihnen haben eine von Intransparenz geprägte Geschichte. Italiens Regierung traf, ohne die Mitsprache oder Einwilligung von betroffenen Gemeinden, Entscheidungen über die Standorte von Lagern und hatte eine sehr hierarchische Herangehensweise an das Beteiligungsverfahren. Angebliche Versuche dies zu ändern, werden kritisch betrachtet und die Legitimität dieser Versuche in Frage gestellt. Auch in Belgien war das Verfahren sehr intransparent. Sie haben jedoch neue Ansätze zur Öffentlichkeitsarbeit, wie Austauschs- und Informationstagen zwischen Expertinnen/Experten und BürgerInnen, umgesetzt. Es gibt jedoch auch Länder wie die Niederlande, die von Beginn an sehr transparent waren. Die BürgerInnen konnten sich stark beteiligen und hatten das Recht Entscheidungen im Bezug zu radioaktiven Abfällen anzufechten (Brunnengräber u. a. 2015).

13 Ausblick

Das Endlager Konrad ist circa zwei Jahre im Verzug und ein neuer Termin für die Inbetriebnahme des Endlagers steht noch nicht fest (siehe Kapitel 2.1.13), was die Einlagerung der radioaktiven Abfälle verzögert.

Für das Ende des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle gemäß des StandAG gibt es ebenfalls noch keinen Termin. Die erste Phase des Verfahrens, die Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung (§14 StandAG), soll 2027 abgeschlossen werden. Anhand von Schätzungen der BGE ergibt sich ein Zeitrahmen von 2043 bis 2062 für einen Abschluss des Standortauswahlverfahrens (BGE 2022). Viele der Genehmigungen der Zwischenlager werden zu diesem Zeitpunkt bereits ausgelaufen sein und müssten für den weiteren Betrieb verlängert werden.

Sicherheit und Sicherung werden als Themen auch zukünftig immer wichtiger. Im Rahmen der Sicherung gibt es das Thema der „Heißen Zelle“, welches seit längerem einen Diskussionsbestandteil darstellt. Sie ist von großer Bedeutung, da in ihr die Behälter nach längerer Lagerzeit geöffnet werden können und der Zustand der Materialien überprüft werden kann (siehe Kapitel 2.1.12). Es bleibt jedoch unklar, ob und wie oft dies zukünftig erforderlich sein wird. Sollte es notwendig werden, einen Behälter zu öffnen, wäre der Einsatz einer Heißen Zelle unerlässlich. Ein entsprechender Zugang und die dafür notwendige Infrastruktur müssten dann langfristig verfügbar bleiben.

Die Sicherheit und Sicherung selbst können auch zukünftig mit vielen Problematiken konfrontiert werden. Naturkatastrophen, wie bspw. Hochwasser, sind mittlerweile in Deutschland jedes Jahr zu beobachten. Terrorismus und technische Ausfälle bieten auch eine Grundlage für die verminderte Gewährleistung der Sicherheit der eingelagerten Abfallbestände in den einzelnen Zwischenlagern. Nichtsdestotrotz können diese Punkte durch die zukünftigen Entwicklungen aufgegriffen werden und dadurch bessere und neuere Sicherheitsmaßnahmen ermöglichen (Eckhardt u. a. 2024).

Ein weiteres zentrales Thema der Zwischenlagerung ist die Abwägung, ob die Effizienz durch eine Konsolidierung der bestehenden Zwischenlagerstandorte gesteigert werden könnte und im selben Zuge größere, zentralere Zwischenlager errichtet werden. Dies könnte wirtschaftliche Vorteile bieten, wie reduzierte Betriebskosten, verbesserte Sicherheitsmaßnahmen und eine einheitliche Überwachung. Kurzfristig ist dieser Lösungsansatz denkbar, langfristig jedoch muss die Dauer der Zwischenlagerung in Betracht gezogen werden. Darüber hinaus bestehen Bedenken wegen der erhöhten Belastung einzelner Regionen und den tendenziell erhöhten Transportkosten (Eckhardt u. a. 2024).

Ein entscheidendes Thema in den gegenwärtigen Gesprächen stellt der Kostenfaktor dar. Die Kosten belaufen sich vor allem auf den Betrieb und die Instandhaltung von Zwischenlagern. Der sichere Transport der Abfälle zwischen den Standorten muss in die Abwägungen der

Kosten inkludiert werden. Langfristig können zusätzliche Kosten für bspw. Modernisierungen oder Erweiterung der Lagerräumlichkeiten, in Anbetracht der Verzögerung der Endlagerung, entstehen. Aus dem langen Standortauswahlverfahren und der verlängerten Zwischenlagerung ergeben sich auch erhöhte Kosten, die durch den KENFO getragen werden müssen (Eckhardt u. a. 2024).

Bereits in den Kapiteln zu den Herausforderungen wurde die Problematik aufgegriffen, dass die Beteiligung der Bevölkerung bereits in der Gegenwart nicht hoch ausfällt (siehe Kapitel 4). Es ist wichtig, Menschen in die Entscheidungsprozesse einzubinden, aber auch mehr Bewusstsein für das Thema zu entwickeln. Da die Endlagerung möglicherweise noch viele Jahrzehnte in Anspruch nehmen wird, besteht die Gefahr, dass sowohl das Interesse als auch die Dringlichkeit in der öffentlichen Wahrnehmung abnehmen wird. Ein fortlaufender Dialog mit der Bevölkerung und die erhöhte Transparenz sind entscheidend, um eine langfristige Lösungsfindung zu gewährleisten, aber auch um Vertrauen zu den Institutionen zu schaffen.

14 Fazit

Das Thema der Zwischenlagerung ist dem Bund präsent, nichtsdestotrotz verbleibt die Bürgerbeteiligung weiter hinter den Erwartungen und Wünschen der Verantwortlichen zurück. Die Endlagersuche wird diskutiert, aber die damit einhergehenden Veränderungen, auch im Rahmen der Zwischenlagerung, sind erst zum Ende des 21. Jahrhunderts denkbar.

Die unterschiedlichen Ansichten und Meinungen zwischen den involvierten AkteurInnen zeigen, dass durchaus viele soziale Herausforderungen in der Transparenz und der Kommunikation bestehen (siehe Kapitel 4.1). Diese Differenzen führen zu Konflikten, obwohl trotzdem ein gemeinsames Ziel verfolgt wird: die Sicherung und Sicherheit des über Jahrzehnte produzierten radioaktiven Abfalls, sowohl bei der Zwischenlagerung als auch zukünftig bei der Endlagerung – und damit einhergehend auch eine sichere und nachhaltige Lösung für die Zukunft.

Diskussionen und informative Formate bilden zwar geeignete Informationsquellen, um gemeinsam Lösungen für die Handhabung der Problematik und der Herausforderungen zu entwickeln, jedoch trägt die Komplexität und Vielschichtigkeit der Umstände dazu bei, dass das Thema für viele Menschen nicht greifbar ist. Es gibt starke Meinungen in der Bevölkerung sowie Unsicherheiten und Risiken, die die Debatte aktiv prägen – diese stellen jedoch die Minderheit dar. Historische Unfälle und Ereignisse mahnen zur Vorsicht und zeigen die Dringlichkeit einer gemeinsamen Lösung. Nun ist es Zeit, gemeinsam die Verantwortung zu tragen und eine Lösung zu finden.

Klar ist: einfach mal so zwischenlagern – das geht nicht. Aus vielen Gründen, welche auch in Zukunft eine hohe Bedeutung haben werden.

Die Ära der Kernenergie ist noch lange nicht vorbei, und die Frage, wo und wie der Atom Müll in Deutschland für die nächsten Millionen Jahre gelagert werden soll, wird voraussichtlich bis Ende dieses Jahrhunderts durch ein umfassendes Standortauswahlverfahren geklärt werden. Bis eine endgültige Entscheidung für ein Endlager getroffen ist, muss der Atom Müll in Zwischenlagern aufbewahrt werden. Da die Genehmigung für diese Zwischenlagerung ursprünglich auf 40 Jahre ausgerichtet war, ist es aufgrund der komplexen Suche nach einem Endlager notwendig, die Zwischenlagerung bei Beibehaltung von Sicherheitsstandards zu verlängern.

Von einer einfachen Lagerung kann hier somit nicht gesprochen werden, denn die Lagerung von radioaktivem Abfall gestaltet sich heute schwieriger als früher angenommen.

Die sichere Lagerung steht vor drei zentralen Herausforderungen: erstens muss die technische Sicherheit gewährleistet werden, zweitens müssen soziale Belange angemessen berücksichtigt werden und drittens sind finanzielle Aspekte zu klären. Während die Verantwortlichen sich darum bemühen, sowohl die verlängerte Zwischenlagerung als auch die zukünftige Endlagerung sicher zu gestalten, fordern Bürgerinitiativen mehr Transparenz. Trotz der Anstrengungen der politischen EntscheidungsträgerInnen bleibt die Informationspolitik bei der aktuellen Zwischenlagerung hinter den Erwartungen zurück.

Es wird zunehmend klar, dass das Vertrauen der Bevölkerung in die politischen Institutionen für die sichere Lagerung von Atom Müll essenziell ist. Gleichzeitig ist es unverzichtbar, die berechnigte Besorgnis der BürgerInnen als wichtige Kontrollinstanz zu berücksichtigen. Beide Perspektiven – das verantwortungsvolle Handeln der Institutionen und die kritische Wachsamkeit der Öffentlichkeit – sind für einen erfolgreichen Lagerungsprozess unerlässlich. Um den komplexen Anforderungen gerecht zu werden, ist umfassende Aufklärungsarbeit erforderlich, um die Gesellschaft langfristig auf die Herausforderungen der Atom Müll Lagerung vorzubereiten. Eine engagierte und transparente Kommunikation ist entscheidend, um sicherzustellen, dass die Lagerung nicht nur technisch, sondern auch gesellschaftlich zukunftssicher gestaltet wird. Da die 100-prozentige Sicherheit eines Endlagers über eine Million Jahre hinweg unmöglich ist, bleibt die einzige Möglichkeit, eine zuverlässige Lösung zu erreichen, auf den neuesten wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen aufzubauen und kontinuierlich den Dialog mit der Öffentlichkeit zu führen, um ein Bewusstsein für die Problematik zu schaffen.

Literaturverzeichnis

- Awawda, Mahdi, und Alexander Wimmers. 2024. „A Scenario-Based Assessment of the Long-Term Funding Adequacy of the German Nuclear Waste Fund KENFO“. arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.16126>.
- Bandt, Dr. Gabriele. 2018. „Konditionierung von radioaktiven Abfällen“. Gehalten auf der Asse2 Begleitgruppe, Wolfenbüttel, Juni 8. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Asse/Vortraege/2018/20180608_Vortrag_Bandt_TUEV-Nord_A2B_Konditionierung.pdf.
- Bärenbold, Rebekka, Muhammad Maladiah Bah, Rebecca Lordan-Perret, Björn Steigerwald, Christian von Hirschhausen, Ben Wealer, Hannes Weigt, und Alexander Wimmers. 2024. „Decommissioning of commercial nuclear power plants: Insights from a multiple-case study“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 201 (September): 114621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114621>.
- BASE. 2020. „Sicherheit der nuklearen Entsorgung – Unsere Grundsätze“. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/broschueren/bfe/grundsätze-broschuere.pdf?__blob=publicationFile&v=8.
- . 2023a. „Atommüll in Deutschland - Was? Woher? Wohin?“ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/broschueren/bfe/atommuell-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- . 2023b. „Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle - Sicherheit bis zur Endlagerung“. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/broschueren/bfe/zwischenlager-broschuere.pdf;jsessionid=3C26E3E1B147EEE9E0125FC040F90441.internet952?__blob=publicationFile&v=30.
- Becker, Oda. 2021. „Aktuelle Situation der Zwischenlagerung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle in Deutschland“. BUND. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/atomkraft/atomkraft_zwischenlager_atommuell_studie_2021.pdf.
- . 2023. „Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle“. BUND. https://www.bund-niedersachsen.de/fileadmin/niedersachsen/publikationen/atom/BUND-Studie_Situation_Deutsche_Zwischenlager_fuer_hoch-radioaktive_Abfaelle_01.pdf.
- Besnard, Manon, Marcos Buser, Ian Fairlie, Gordon MacKerron, Allison Macfarlane, Eszter Matyas, Yves Marignac, Edvard Sequens, Johan Swahn, und Ben Wealer. 2019. „The World Nuclear Waste Report 2019. Focus Europe“. https://worldnuclearwastereport.org/wp-content/themes/wnwr_theme/content/World_Nuclear_Waste_Report_2019_Focus_Europe.pdf.
- Beyer, Falk. 2004. „Die (DDR-)Geschichte des Atommüll-Endlagers Morsleben“. Magdeburg: Die Landesbeauftragte für die Unterlagen des Staatssicherheitsdienstes der ehemaligen DDR in Sachsen-Anhalt. https://www.atommuellreport.de/fileadmin/Dateien/pdf/Datenblaetter/Morsleben/Beyer_Geschichte_Morsleben.pdf.
- BfS. 2017. „Schachanlage Asse II - Stand der Arbeiten zur Rückholung“. Bundesamt für Strahlenschutz. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Asse/Wesentliche_Unterlagen/Archiv_Downloads/Asse/DE/broschueren/asse-broschuereb1dd.pdf.
- BGE. 2020. „Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG“. Bundesgesellschaft für Endlagerung. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf.

- . 2022. „Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE. Rahmenterminplanung für Schritt 2 der Phase I bis zum Vorschlag der Standortregionen und zeitliche Abschätzungen für Phase II und III“. Bundesgesellschaft für Endlagerung. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/05_-_Meilensteine/Zeitliche_Betrachtung_des_Standortauswahlverfahrens_2022/20221216_Zeitliche_Betrachtung_StandAW-48_barrierefrei.pdf.
- BGZ. 2021. „Rücknahme radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung“. Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung. https://bgz.de/wp-content/uploads/2022/04/BGZ_Flyer_Rueckfuehrung.pdf.
- . 2024. „Sichere Zwischenlagerung kurz und knapp“. Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung. https://bgz.de/wp-content/uploads/2024/06/BGZ_Broschuere_Sichere-Zwischenlagerung_2024_Web.pdf.
- BMU. 2015. „Bericht über Kosten und Finanzierung der Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle“. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/abfallentsorgung_kosten_finanzen_bf.pdf.
- BMUV. 2023. „Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2022 und Prognose)“. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/2022_verzeichnis_radioaktiver_abfaelle.pdf.
- Brammer, Klaus-Jürgen. 2018. „Übertragung der Standortzwischenlager auf die BGZ“. Gehalten auf der Zwischenlagerworkshop, Hannover, April 20. https://www.atommuellreport.de/fileadmin/Dateien/Tagungen/Fachtagungen/Praesentation_2018-04-20_Atommuellreport_Dr._Brammer-red.pdf.
- Brohmann, Bettina, Achim Brunnengräber, und Peter Hocke. 2021. *Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche*. Herausgegeben von Ana María Isidoro Losada. Bd. 115. Bielefeld: transcript. <https://doi.org/10.14361/9783839456682>.
- Brunnengräber, Achim, Hrsg. 2016. *Problemfälle Endlager: gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atom Müll*. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos, Edition Sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft.
- Brunnengräber, Achim, Maria Rosaria Di Nucci, Ana Maria Isidoro Losada, Lutz Mez, und Miranda A. Schreurs, Hrsg. 2015. *Nuclear Waste Governance: An International Comparison*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-08962-7>.
- Camurdas, Lena-Jülide, Reni Safitri, Insa Zillmann, Fabian Präger, Alexander J. Wimmers, Christian von Hirschhausen, Alexander Tetsch, und Sibylle Tetsch. 2023. *Einfach mal abschalten - und dann? Die Geschichte der deutschen Atomkraft und ihr radioaktives Erbe*. München: oekom verlag.
- Deutscher Bundestag. 2016a. „Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“. 18/9100. Deutscher Bundestag. <https://dserver.bundestag.de/btd/18/091/1809100.pdf>.
- . 2016b. „Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes“. Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle Drucksache 18/9100. <https://dserver.bundestag.de/btd/18/091/1809100.pdf>.
- Eckhardt, Anne, Frank Becker, Volker Mintzlaff, Dirk Scheer, und Roman Seidl, Hrsg. 2024. *Entscheidungen in die weite Zukunft: Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-42698-9>.

- Entsorgungskommission. 2013. „ESK-Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“. 10. Juni 2013. <https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/downloads/empfehlungenesk34llabfrevfassung10062013.pdf>.
- . 2023. „Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern“. https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Empfehlung_L-L-ZL-BE_ESK109_07.09.2023_1.pdf.
- Frieß, Friederike, Nikolaus Arnold, Wolfgang Liebert, und Nikolaus Müllner. 2021. „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle“. Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) urn:nbn:de:0221-2021030826033. Berlin; Wien: Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU).
- GNS. 2023a. „Konrad-Container - Stahlblechcontainer Typ I–VI“. Gesellschaft für Nuklear-Service. https://www.gns.de/media/ht5j4hcw/konrad_container_ewb_produkinfo_2023_10_de_v01.pdf.
- . 2023b. „UBA – Ummantelte Betonabschirmung“. Gesellschaft für Nuklear-Service. https://www.gns.de/media/luojukrz/uba_produkinfo_2023_10_de_v01.pdf.
- Gompper, Klaus, Andreas Geist, und Horst Geckeis. 2010. „Actinoidenabtrennung Aus Hochradioaktiven Abfällen“. *Nachrichten Aus Der Chemie* 58 (10): 1015–19. <https://doi.org/10.1002/nadc.201075744>.
- Götte, Sebastian, Lutz Rummel, und Marina Plietsch. 2023. „Halt mal kurz ... Die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle im Spiegel der Bevölkerung in betroffenen Regionen“. Ergebnisbericht. Weimar. https://bgz.de/wp-content/uploads/2024/02/BGZ-Umfrage-zur-Zwischenlagerung_Ergebnisbericht-2023.pdf.
- GRS. 2010. „Sicherheitstechnische Aspekte der langfristigen Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen und verglastem HAW“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. <https://www.grs.de/sites/default/files/publications/GRS-A-3597.pdf>.
- . 2019. „CASTOR®-Behälter | GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. https://www.acamedia.info/sciences/J_G/haw-fragen/CASTOR-Behaelter_GRS.pdf.
- Hirschhausen, Christian von. 2023. *Atomenergie: Geschichte und Zukunft einer riskanten Technologie*. Originalausgabe. C.H. Beck Wissen 2944. München: C.H. Beck.
- Hirschhausen, Christian von, Clemens Gerbaulet, Claudia Kemfert, Felix Reitz, und Cornelia Ziehm. 2015. „Atomausstieg geht in die nächste Phase: Stromversorgung bleibt sicher – grosse Herausforderungen und hohe Kosten bei Rückbau und Endlagerung“. *DIW Wochenbericht* 82 (22): 523–31.
- Hirschhausen, Christian von, und Alexander Wimmers. 2023. „Rückbau von Kernkraftwerken und Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland: ordnungspolitischer Handlungsbedarf“. *Perspektiven der Wirtschaftspolitik* 24 (3): 286–301. <https://doi.org/10.1515/wpp-2023-0032>.
- Kendzioriski, Mario, Claudia Kemfert, Fabian Präger, Christian von Hirschhausen, Robin Sogalla, Björn Steigerwald, Ben Wealer, Richard Weinhold, und Christoph Weyhing. 2021. „Atomwende: Abschaltung von Kernkraftwerken eröffnet Perspektiven für die Endlagersuche“. *DIW Wochenbericht* 88:767–75. https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2021-47-1.
- KENFO. 2023. „Geschäftsbericht 2023“. Fonds zur Finanzierung der kerntechnischen Entsorgung. https://www.kenfo.de/fileadmin/user_upload/geschaeftsberichte/kenfo_geschaeftsbericht_2023.pdf.
- Köhnke, Dennis. 2017. *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle*. Wiesbaden: Springer. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-658-19040-8_1.pdf.

- Krohn, Judith, Angelika Spieth-Achtnich, Silvia Schütte, Mbah Melanie, Alexandra Lampke, Katja Hünecke, Dörte Fouquet, Jörg Kuhbier, und Tobias Reinhardt. 2024. „Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta)“. Abschlussbericht FKZ 4718F10001. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/fachinfo/fa/pasta_abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- Lersow, Michael. 2018. *Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen: Langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung in Geotechnischen Umweltbauwerken – Sachstand, Diskussion und Ausblick*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57822-3>.
- Neles, Julia Mareike, und Christoph Pistner, Hrsg. 2012. *Kernenergie: Eine Technik für die Zukunft?* Technik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24329-5>.
- Neuber, Jens Christian. 2010. „Kritikalitätssicherheit der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe - Grundlegende Anforderungen“. https://www.researchgate.net/publication/360889581_Kritikalitätssicherheit_der_Endlagerung_ausgedienter_Kernbrennstoffe_-_Grundlegende_Anforderungen.
- Neumann, Wolfgang. 2015. „Heiße Zellen für die Zwischenlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung und bestrahlte Brennelemente“. https://www.bundestag.de/resource/blob/377932/4867b21957055053b566e7b4a8b7697e/drs_109-data.pdf.
- Ott, Konrad, Klaus-Jürgen Röhlig, Fabian Präger, und Christian von Hirschhausen. 2024. „Für mehr Tempo in der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“. *Forschungsjournal Soziale Bewegungen Plus* 37 (4). https://forschungsjournal.de/fjsb/wp-content/uploads/fjsb-plus_2024-4_ott.pdf.
- Pönitz, Erik. 2017. „Wärmeentwicklung und Radionuklid-Inventar“. In *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle*, herausgegeben von Dennis Köhnke, Manuel Reichardt, und Franziska Semper, 29–50. Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-19040-8_3.
- Präger, Fabian, Achim Brunnengräber, und Christian von Hirschhausen. 2023. „Atomwende? Ja, bitte! Warum die Abkehr von der Atomenergie und eine gute Entsorgungspolitik die Energiewende in Deutschland befördern werden“. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 32 (1): 86–90. <https://doi.org/10.14512/gaia.32.1.3>.
- Schneider, Mycle, Antony Froggatt, Julie Hazemann, Özgür Gürbüz, Paul Jobin, Phil Johnstone, Timothy Judson, u. a. 2024. „The World Nuclear Industry Status Report 2024“. Paris, France: Mycle Schneider Consulting. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2024-v2.pdf>.
- Siempelkamp. 2023. „Heiße-Zellen“. Januar 2023. https://www.siempelkamp-nis.com/fileadmin/NIS/Nuklear_und_R%C3%BCckbau/Reststoff_und_Abfall/Hei%C3%9Fe-Zellen.pdf.
- Stieglitz, L. 1978. „Die routineanalytische Bestimmung von Di- und Tributylphosphat in PUREX-Prozesslösungen“. Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. <https://core.ac.uk/reader/197574310>.
- WDR. 2023. „Atom Müll-Zwischenlager Würgassen kommt doch nicht“. 12. Dezember 2023. <https://www1.wdr.de/nachrichten/westfalen-lippe/atommuell-zwischenlager-wuergassen-vom-tisch-100.html>.
- Wegel, Sebastian, Victoria Czempinski, Pao-Yu Oei, und Ben Wealer. 2019. „Transporting and Storing High-Level Nuclear Waste in the U.S.—Insights from a Mathematical Model“. *Applied Sciences* 9 (12): 2437. <https://doi.org/10.3390/app9122437>.
- Wimmers, Alexander, Rebekka Bärenbold, Muhammad Maladoh Bah, Rebecca Lordan-Perret, Björn Steigerwald, Christian von Hirschhausen, Hannes Weigt, und Ben Wealer. 2023. „Decommissioning of Nuclear Power Plants: Regulation, Financing, and Production“. DIW Data Documentation 104. Berlin: DIW Berlin, German Institute for Economic Research.

https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.864222.de/diw_datadoc_2023-104.pdf.

- Wimmers, Alexander, Leonard Göke, Christian von Hirschhausen, und Claudia Kemfert. 2023. „Ökonomische Aspekte der Atomkraft“, März. https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/atomausstieg/PDF/Studie_Oekonomische_Aspekte_der_Atomkraft.pdf.
- Yim, Man-Sung. 2022. *Nuclear Waste Management: Science, Technology, and Policy*. Bd. 83. Lecture Notes in Energy. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-2106-4>.
- Zahoransky, Richard, Hrsg. 2022. *Energietechnik: Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-34831-1>.