

Factsheet: Langzeitzwischenlagerung als Entsorgungsoption für hochradioaktive Abfälle?¹

Stand: Juli 2024

Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ hat im Auftrag des Bundestages verschiedene Optionen für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle geprüft. Sie kam zum Ergebnis, dass eine Endlagerung in einem Bergwerk die bestmögliche Langzeitsicherheit bietet (Endlagerkommission 2016). Der Empfehlung der Kommission folgend, hat der Bundestag beschlossen, die Endlagerung in einem Bergwerk für alle hochradioaktiven Abfälle in Deutschland anzustreben. Parallel zur Vorbereitung und Umsetzung dieser Endlagerung prüft das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) fortlaufend, ob es inzwischen alternative Entsorgungsoptionen gibt, die aufgrund von wissenschaftlichen und technischen Fortschritten der Endlagerung in einem Bergwerk sicherheitstechnisch überlegen sind (BT-Drs. 18/11398). Das Folgende ist eine Zusammenfassung des aktuellen Wissensstands auf der Grundlage des vom BASE beim Öko-Institut e.V. beauftragten und im Jahr 2023 abgeschlossenen Forschungsvorhabens „Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle“ (altEr).

Kurzzusammenfassung

Die Langzeitzwischenlagerung ist eine trockene Lagerung hochradioaktiver Abfälle in einem Lagergebäude für mehrere Hundert Jahre und ist somit nur eine Übergangslösung; sie erfordert einen nachgeschalteten endgültigen Entsorgungsschritt. Die technischen Herausforderungen der Langzeitzwischenlagerung sind grundsätzlich beherrschbar. Die Alterungsprozesse im radioaktiven Inventar, die während der über mehrere Jahrhunderte andauernden Langzeitzwischenlagerung ablaufen, und deren Auswirkungen sind allerdings nicht bzw. nur mit großen Unsicherheiten prognostizierbar. Auch das Risiko durch mögliche zukünftige Bedrohungen der Zwischenlager durch menschliche und naturbedingte Einflüsse lässt keine verlässlichen Schätzungen zu. Bei einer Entscheidung für die Langzeitzwischenlagerung müssten die Alterungsmechanismen der relevanten Barrieren weiterhin wissenschaftlich erforscht werden. Sicherheits-

¹ Das Konzept der Langzeitzwischenlagerung wird in diesem Dokument aus verschiedenen wissenschaftlichen Perspektiven beleuchtet. Es unterscheidet sich von der derzeit in Deutschland praktizierten Zwischenlagerung. Die Genehmigungsfähigkeit einer solchen Langzeitzwischenlagerung nach den geltenden Anforderungen des Atomrechts (insbes. § 6 Atomgesetz) ist nicht Gegenstand der Betrachtung. Über die Genehmigung eventueller Langzeitzwischenlager zu einem unbestimmten zukünftigen Zeitpunkt könnte nur fallspezifisch auf Grundlage eines konkret gestellten Antrags entschieden werden. Zu hypothetischen Genehmigungsverfahren oder -voraussetzungen werden hier keine Aussagen gemacht.

technische, gesellschaftliche, organisatorische und finanzielle Aspekte sprechen gegen eine aktive Verfolgung einer solchen Strategie, da nachfolgenden Generationen die Überwachung der Langzeitzwischenlagerung sowie gegebenenfalls Reparaturmaßnahmen, die spätere Entsorgung sowie der damit einhergehende notwendige Kompetenzerhalt aufgebürdet würden.

1. Langzeitzwischenlagerung

Eine Langzeitzwischenlagerung (LZZL) ist eine trockene Lagerung radioaktiver Abfälle in einem oberirdischen oder oberflächennahen Lagergebäude, die mehrere Hundert Jahre andauert. Im Gegensatz dazu ist die in Deutschland derzeit praktizierte Zwischenlagerung lediglich auf einige Jahrzehnte ausgelegt. Die LZZL wird von Anfang an entsprechend dieser längeren Zeiträume konzipiert und genehmigt. Sie stellt keine finale Entsorgung radioaktiver Abfälle dar. Stattdessen verschafft sie Zeit für die Entwicklung einer geeigneten endgültigen Entsorgungsoption und eröffnet somit die Möglichkeit, zukünftige (heute technisch noch nicht ausgereifte) Entsorgungswege zu nutzen.

Über den gesamten Zeitraum der LZZL sind Maßnahmen zur Überwachung und zum Schutz des Langzeitzwischenlagers und der darin gelagerten Abfälle erforderlich. Die langfristige Verfügbarkeit technischer Einrichtungen zur Kontrolle, Handhabung und gegebenenfalls Umverpackung der Abfälle ist Bestandteil des Konzepts. Das Zwischenlagergebäude und die technischen Einrichtungen müssen stets den aktuellen Anforderungen an sie genügen und bei Bedarf entsprechend nachgerüstet werden.

Das Konzept der Langzeitzwischenlagerung umfasst folgende Schritte (s. Abbildung 1):

1. Konditionierung für die Langzeitzwischenlagerung

Abgebrannte Brennelemente aus Reaktoren, Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung und andere hochradioaktive Abfälle werden konditioniert und in geeignete Behälter verpackt, zum Langzeitzwischenlager transportiert und dort eingelagert.

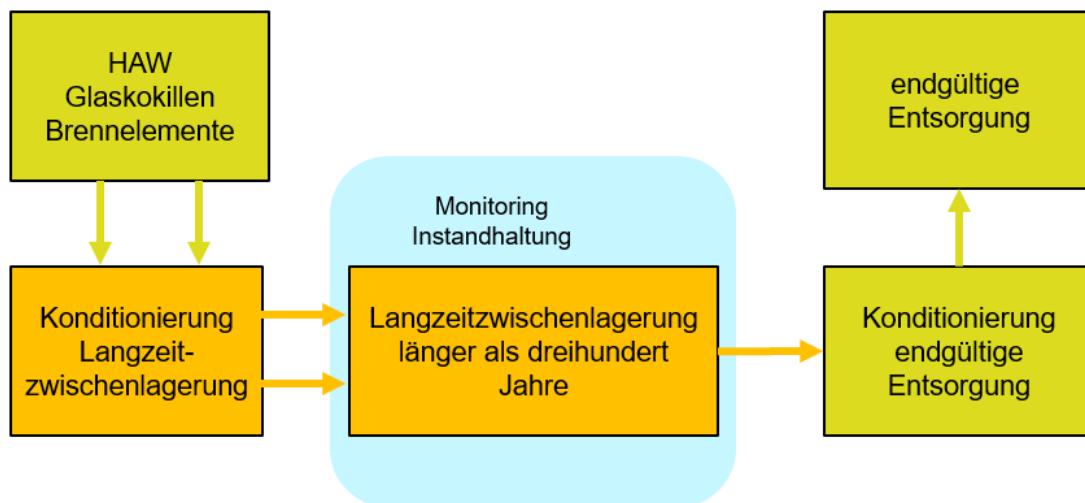
2. Langzeitzwischenlagerung

Das Zwischenlagergebäude und die eingelagerten Abfallgebinde werden kontinuierlich überwacht und instand gehalten.

3. Endgültige Entsorgung

Die hochradioaktiven Abfälle werden nach der Langzeitzwischenlagerung ihrer weiteren Behandlung bzw. ihrer endgültigen Entsorgung zugeführt (beispielsweise der tiefengeologischenendlagerung). Abhängig von den Rahmenbedingungen kann eine erneute Konditionierung und Umverpackung erforderlich sein.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Langzeitzwischenlagerung



Quelle: Englert et al. (2022)

In den ersten Jahren der LZZL geht der Großteil der Radioaktivität in den abgebrannten Brennelementen von den hochradioaktiven Spaltprodukten aus. Nach wenigen Hundert Jahren wird die Radioaktivität durch den Zerfall der langlebigeren Aktinide, insbesondere Pu-239 und Am-241, dominiert (Ewing 2015). Die Radioaktivität der Spaltproduktkokillen geht in Abhängigkeit vom Anfangsinventar nach 500 bis 1000 Jahren soweit zurück, dass die Kokillen zumindest in den Übergangsbereich von hochaktivem zu mittelaktivem geringfügig wärmeentwickelndem Abfall eingeordnet werden. Die Masse der Abfälle verringert sich während der anvisierten Zwischenlagerzeiten nicht. Zu beachten ist, dass die Konditionierung für die Langzeitzwischenlagerung Auswirkungen auf die Auswahl späterer Entsorgungsoptionen haben kann, die zum Konditionierungszeitpunkt noch nicht absehbar sind. Beispielsweise könnte eine höhere Robustheit der Abfallgebinde zusätzlichen Aufwand bei einer Konditionierung für weitere Entsorgungsschritte generieren.

2. Langzeitzwischenlagerung als Entsorgungsmöglichkeit

Eine Langzeitzwischenlagerung von mehreren Hundert Jahren stellt deutlich höhere Anforderungen an die Auslegung der Zwischenlagergebäude und das Lagerungskonzept als eine Zwischenlagerung über Jahrzehnte. Die Langzeitzwischenlagerung muss so ausgelegt sein, dass sie auch langfristig zu unterstellenden Einwirkungen standhält. Überfällige Langzeitzwischenlager können zum Beispiel besser vor Überflutungen geschützt werden

und zudem sind ihre Instandhaltung sowie die Errichtung einer Zuwegung einfacher. Dafür bieten untertägige Lagereinrichtungen und Tunnellösungen mehr Sicherheit gegen menschliche Einwirkungen sowie gegen natürliche Phänomene wie Sturm oder Vereisung.

Aufgrund fehlender Erfahrungen mit Langzeitlagerung muss umfangreich überwacht und regelmäßig geprüft werden, ob die Lagerbehälter weiterhin dicht sind. Alterungseffekte an den Behältern müssen möglichst frühzeitig entdeckt werden.

Für den Erhalt der Betriebsbereitschaft der technischen Einrichtungen sowie den Ersatz defekter Komponenten über lange Zeiträume hinweg muss ein Wartungs- und Instandhaltungskonzept entwickelt werden. Ersatzteile müssen bei Bedarf nachgefertigt werden können. Um Reparaturbedarf bestmöglich identifizieren und Instandhaltungsmaßnahmen möglichst zielführend durchführen zu können, muss der Stand von Wissenschaft und Technik genau verfolgt werden.

Für den Fall notwendiger Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen an den Lagerbehältern müssen die Langzeitzwischenlagergebäude – anders als bei heutigen Zwischenlagerkonzepten – nicht nur über Handhabungsanlagen für die Behälter und eine Behälterwartungsstation, sondern gegebenenfalls auch über eine sogenannte "heiße Zelle" einschließlich Handhabungsequipment für die Inventare verfügen.

3. Entwicklungsstand von Konzepten zur Langzeitzwischenlagerung

Die Entwicklung der Technologien für eine Langzeitzwischenlagerung basiert in wesentlichen Teilen auf den Forschungs- und Entwicklungsergebnissen im Bereich der bereits praktizierten Zwischenlagerung. Dementsprechend sind die Erforschung und die Entwicklung geeigneter Zwischenlagerungskomponenten abgeschlossen. Die Machbarkeit geeigneter Lagerbehälter für die verschiedenen Abfallarten und die Realisierbarkeit von Zwischenlagergebäudekonzepten wurden ebenfalls nachgewiesen. Die bis heute bereits realisierten Zwischenlagerzeiten können hingegen nicht als Nachweis für die Umsetzbarkeit von Langzeitzwischenlagerungskonzepten, welche den wesentlich längeren Zeitraum von mehreren Hundert Jahren vorsehen, betrachtet werden. Ein vollständiger Leistungsnachweis für das Lagerbehälterkonzept sowie für das Gebäudekonzept mit Monitoring, Instandhaltung und Erhalt der Transportfähigkeit der Abfälle ist daher vor Abschluss der durchgeführten Langzeitzwischenlagerung prinzipiell nicht möglich.

Bei den Glaskokillen mit Spaltprodukten wird von sukzessiver Aktivitätsreduzierung und nur geringen Veränderungen in der Glasmatrix ausgegangen, weshalb deren Langzeitzwischenlagerung als machbar eingestuft wird. Die hochabgebrannten Mischoxid-Brennstoffe (MOX), also Brennstoffe aus wiederaufgearbeitetem Uran und Plutonium, sind dagegen wesentlich alterungsanfälliger und reaktiver. Prognosen zu ihrem Zustand nach langer Zwischenlagerung sowie zu hieraus resultierenden Auswirkungen auf die Konditionierung für die endgültige Entsorgung beinhalten viele Ungewissheiten.

Aufgrund von Prognoseunsicherheiten bezüglich klimatischer und gesellschaftlicher Entwicklungen sollte die technische Machbarkeit des Konzeptes vorsichtig bewertet werden.

Die infolge der aktuellen Nichtverfügbarkeit von Endlagern hinausgezögerte Entsorgung und die weltweit stetig wachsenden Inventare an hochradioaktiven Abfällen haben international bewirkt, dass Forschung zu Alterungsmechanismen von abgebrannten Brennstoffen und deren Monitoring vorangetrieben wird. Neue Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente und andere hochradioaktive Abfälle werden in einigen Ländern bereits so konzipiert, dass die Brennelemente für möglichst lange Zeiträume gegen Einwirkungen von außen geschützt sein sollen.

Staaten mit geringem Aufkommen an hochradioaktiven Abfällen wie Spanien oder die Niederlande verfolgen bzw. favorisieren eine verlängerte Zwischenlagerung, bis eine endgültige Entsorgungslösung zur Verfügung steht. Diese Länder beabsichtigen nicht notwendigerweise, in den nächsten Jahrzehnten ein eigenes Endlager in Betrieb zu nehmen. Das niederländische Langzeitzwischenlager HABOG verfolgt bereits ein konkretes Konzept: Es umfasst die Lagerung von Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung sowie einige wenige andere hochaktive Abfälle, aber keine abgebrannten Brennelemente aus Leistungsreaktoren. Das Langzeitzwischenlager HABOG ist für eine Lebensdauer von mindestens einhundert Jahren ausgelegt. Seine Trockenlager können jedoch bei Bedarf renoviert oder ersetzt werden, um eine längere Zwischenlagerungszeit zu ermöglichen. Dieses Konzept für die langfristige sichere Zwischenlagerung über einen Zeitraum von 100 bis 300 Jahren wird international als Best Practice bewertet.

In den USA analysierte die Nuclear Regulatory Commission (NRC) für bestehende Lagereinrichtungen für abgebrannte Brennelemente Szenarien mit einer Dauer von 100 Jahren und von mehr als 240 Jahren. Neben der kontinuierlichen Wartung wurden auch die Konstruktion und der Betrieb von Trockentransfersystemen zur Instandhaltung (DTS) sowie der mindestens einmal alle 100 Jahre vorzusehende Austausch von Trockenlagergebäu-

den und DTS, einschließlich der entsprechenden Behältersysteme, angenommen. Die sichere Lagerung von abgebrannten Brennelementen in Trockenbehältern wird für die betrachteten Zeiträume als technisch realisierbar erachtet. Als Standort wird eine geologisch stabile Region in New Mexico favorisiert, die idealerweise über trockenes, arides Klima verfügt (siehe Abbildung 2). Im Mai 2023 erteilte die amerikanische Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde U.S. NRC eine spezifische Lizenz zum Bau und Betrieb des HI-store CISF (Consolidated Interim Storage Facility) in Lea County, im Südosten von New Mexico.

Abbildung 2: Trockenlagersystem der Firma Holtec im Südosten von New Mexico



Quelle: <https://holtecinternational.com>

(zuletzt abgerufen: 13.07.2022)

Die kerntechnische Industrie der USA befasst sich zudem im Rahmen des Extended Storage Collaboration Program (ESCP), das vom Electric Power Research Institute (EPRI) koordiniert wird, mit der Sicherheit von verlängerter Trockenlagerung bei mehrfacher Verlängerung der in den aktuellen amerikanischen Regelwerken festgelegten Zeiträume.

4. Sicherheitsaspekte der Langzeitzwischenlagerung

Insbesondere hochabgebrannte Uran- und MOX-Brennstoffe sowie ihre umgebenden Hüllrohre unterliegen Alterungsmechanismen, die nach längerer Lagerzeit zu einer Verschlechterung des Materialzustands der Hüllrohre und der Brennstofftabletten führen. Dies könnte – abhängig von der gewählten Konditionierung vor LZZL – Probleme bei der Handhabung, der Lagerung und dem Transport verursachen. Klimatische oder andere natürliche wie auch menschlich bedingte Einwirkungen von außen auf das Langzeitzwischenlager, die aus heutiger Sicht noch nicht absehbar sind und deshalb bei der Lagerauslegung unberücksichtigt bleiben, könnten zu einer radiologischen Freisetzung führen.

In den abgebrannten Brennelementen ist kernwaffenfähiges Material enthalten, insbesondere Plutonium. Die von dem hochradioaktiven Abfall ausgehende Strahlung stellt allerdings eine Barriere vor einer missbräuchlichen Verwendung des spaltbaren Materials dar, sodass von der Langzeitlagerung keine relevante Proliferationsgefährdung ausgeht, solange das System zur Kontrolle der Kernbrennstoffe gemäß dem Safeguards-Konzept funktioniert. Auch eine Entwendung von erheblichen Mengen von Kernbrennstoffen durch Angreifer kann ausgeschlossen werden, sofern das heutige Sicherungs- und

Schutzkonzept für Zwischenlager umgesetzt wird. Dies setzt ein über Jahrhunderte funktionierendes Staatswesen voraus, das für die Sicherheit der Langzeitlagerung unabdingbar ist.

5. Konsequenzen für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland

Die Langzeitzwischenlagerung verschafft mehr Zeit für die Erforschung und Entwicklung neuer Behandlungsmöglichkeiten und endgültiger Entsorgungswege. Andererseits zögert sich die endgültige Entsorgungslösung, wie beispielsweise die derzeit angestrebte Einlagerung in tiefen geologischen Schichten, hierdurch wesentlich hinaus und wird auf nachfolgende Generationen verlagert. Die betroffenen Generationen könnten eventuell vor größere rechtliche, technische, gesellschaftliche, organisatorische und finanzielle Probleme als die von der Kernenergie profitierenden Generationen gestellt werden. Für die technische Entwicklung, die Planung und die Standortsuche eines oder mehrerer Langzeitzwischenlager wären in Deutschland aus heutiger Sicht mindestens 10 bis 20 Jahre erforderlich. Unter den derzeit gültigen Randbedingungen ist davon auszugehen, dass die Inbetriebnahme eines Langzeitzwischenlagers nicht mehr während der aktuellen Genehmigungsdauer der bestehenden Zwischenlager realisierbar wäre. Zudem wären erhebliche Akzeptanzprobleme zu erwarten, da die Dauer und die Konsequenzen der Einlagerung nicht überschaubar sind.

Literaturverzeichnis

BT-Drs. 18/11398: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398.

Ewing, R. C. (2015): Long-term storage of spent nuclear fuel, To design reliable and safe geological repositories it is critical to understand how the characteristics of spent nuclear fuel evolve with time, and how this affects the storage environment. (Nature Materials, Vol 14), March 2015. Online verfügbar unter www.nature.com/naturematerials.

IRSN (2018) Report/2019-00318: "International panorama of research on alternatives to geological disposal of high-level waste and long-lived intermediate-level waste"; Report prepared in response to a request by the National Commission for Public Debate (CNDP).

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission) (2016): Abschlussbericht. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Berlin (Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268). Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/re-source/blob/434430/35fc29d72bc9a98ee71162337b94c909/drs_268-data.pdf.

Englert, Matthias; Mohr, Simone; Chaudry, Saleem; Kurth, Stephan; Krob, Florian (2024): Verfolgung und Aufbereitung des Standes von Wissenschaft und Technik bei alternativen Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Abfälle (altEr). Abschlussbericht. Öko-Institut e.V. BASE – Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung, BASE-029/24. 250 S.: Berlin. URN: urn:nbn:de:0221-2024052844041.

TÜV NORD und Öko-Institut e.V. (2015): „Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaster Abfälle“; Oktober 2015; erstellt im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.

U.S.NRC (2018): Dry Storage and Transportation of High Burnup Spent Nuclear Fuel Draft Report for Comment Manuscript Completed: April 2018 Date Published: July 2018 Office of Nuclear Material Safety and Safeguards.