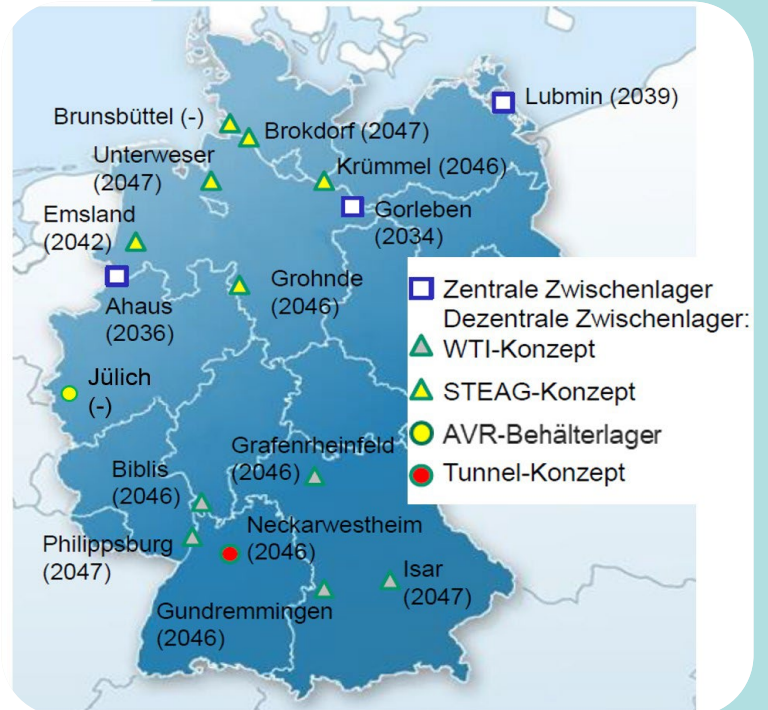




Aspekte im Hinblick auf eine Neugenehmigung von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente nach 40 Jahren Betriebszeit

Neles, Julia Mareike; Becker, Frank; Hassel, Thomas; Leusmann, Thorsten; Metz, Volker; Scharf, Isabelle

Gefördert durch:



Gefördert im
Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 02E11849A-J

Impressum

Mit dem Projekt TRANSENS wird erstmalig in Deutschland transdisziplinäre Forschung zur nuklearen Entsorgung in größerem Maßstab betrieben.

TRANSENS ist ein Verbundvorhaben, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages und im Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) von 2019 bis 2024 gefördert (FKZ 02E11849A-J).

TRANSENS lebt vom pluralen Austausch. Die TRANSENS-Berichte spiegeln die Meinung der Autor*innen wider. Diese Meinungen müssen nicht mit den Meinungen anderer Beteiligter an TRANSENS übereinstimmen.

Kontakt: Julia Mareike Neles, Öko-Institut e. V., j.neles@oeko.de

TRANSENS-Bericht eingereicht am 31.07.2024, veröffentlicht am 20.01.2025

Review: apl. Prof. Dr. Ulrich Smeddinck

Zitierweise: Neles, J., Becker, F., Hassel, T., Leusmann, T., Metz, V., Scharf, I. (2024): Aspekte im Hinblick auf eine Neugenehmigung von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente nach 40 Jahren Betriebszeit nach 40 Jahren Betriebszeit. Braunschweig, Darmstadt, Hannover, Karlsruhe, TRANSENS-Bericht-25.

ISSN (Online): 2747-4186

DOI: 10.21268/20241213-0; (<https://doi.org/10.21268/20241213-0>)

Titelbild: TRANSENS

Das Werk „Aspekte im Hinblick auf eine Neugenehmigung von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente nach 40 Jahren Betriebszeit“ einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und steht unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung – Nicht-kommerziell – Keine Bearbeitung 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0 DEED, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Von der vorgenannten Lizenz ausgenommen sind die in dem Werk zitierten Abbildungen 1, 2 und 3 gemäß Abbildungsverzeichnis sowie als solche gekennzeichnete Zitate. Diese werden nach der Zitatregelung in § 51 des Deutschen Urhebergesetzes (UrhG) verwendet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	7
2. Aufbewahrung und Behälter	10
3. Inventarverhalten und Schnittstelle zur Endlagerung	16
4. Gebäude	22
5. Öffentlichkeitsbeteiligung	30
6. Fazit	36
Literaturverzeichnis	39

Zusammenfassung

Die Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und weiterer hochradioaktiver Abfälle wurde von Anfang an in den jeweiligen Standortregionen kritisch begleitet. Durch die diskutierten zeitlichen Verschiebungen im Standortauswahlverfahren würde sich die Dauer der Zwischenlagerung um mehrere Generationen verlängern. Öffentlichkeitsbeteiligung ist formell in der Umweltverträglichkeitsprüfung als Bestandteil des Genehmigungsverfahrens des jeweiligen Zwischenlagers vorgesehen. Je nach Ausgestaltung der Genehmigungsdauer wird ggf. keine weitere Beteiligung erfolgen. Informelle Formate sieht die Unternehmenskommunikation der jeweiligen Betreiber vor. Diese sind vielfältig ausgestaltet z. B. für verschiedene Zielgruppen und zu verschiedenen Anlässen oder Themen. Es fehlen aber unabhängige Angebote bzw. Angebote von den verantwortlichen Behörden, die eine ergänzende Themensetzung übernehmen könnten. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da die Dauer der Zwischenlagerung von dem Standortauswahlverfahren abhängig ist. Letzteres wird durch kontinuierliche Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung sowohl auf nationaler als auch regionaler Ebene begleitet. Dies führt zu einer Ungleichbehandlung, der auch im Hinblick auf die Würdigung der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe entgegengewirkt werden sollte. Vorgeschlagen werden neben der Etablierung von unabhängigen Dialogangeboten auch eine Berücksichtigung der kommunalen Vertreter:innen im Standortauswahlverfahren. Beteiligungsformate an den Zwischenlagerstandorten und ihre Verzahnung mit dem Standortauswahlverfahren sollten regelmäßig evaluiert und angepasst werden.

In Deutschland wird das Inventar hochradioaktiver Abfälle in Transport- und Lagerbehältern (TLB) zwischengelagert. Ausgenommen davon ist eine kleine Teilmenge ausgedienter Brennelemente, die sich noch in Lagerbecken von Leistungsreaktoren befindet. Die Integrität und der Nachweis dieser ist also für die verlängerte Zwischenlagerung eine entscheidende Grundlage, wobei bezogen auf den TLB der Nuklideinschluss und die Transportfähigkeit bis zum Endlagerstandort sichergestellt werden muss. Dabei müssen Fragen beantwortet werden, ob die TLB bei verlängerter Zwischenlagerung einer entscheidenden und das Schutzziel verringernden Alterung unterliegen. Bleiben die Umgebungsbedingungen im Zwischenlager konstant, ist auch bei einer verlängerten Lagerung keine signifikante Materialschädigung (z.B. durch Korrosion) am Behälter zu erwarten. Der Nachweis der Dichtheit der Deckelsysteme und die Transportfähigkeit sind hierbei die zu betrachtenden Elemente für den TLB. Für beide Themen gibt es jetzt schon Szenarien im Genehmigungsverfahren, die die Nachweisführung einer optimalen Funktion erfüllen, sodass behälterseitig einer verlängerten Zwischenlagerung nichts im Wege steht. Über eine Zeitspanne von vielen Jahrzehnten, gegebenenfalls einem Jahrhundert von Beginn der Zwischenlagerung bis zur Einlagerung des gesamten Inventars in einem tiefen geologischen Endlager, erfolgt eine allmähliche Abnahme der Integrität bzw. Abnahme der Handhabbarkeit der Behälterinventare. In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, dass nicht allein die Sicherheit der Zwischenlagerung an sich, sondern auch der nachfolgende Entsorgungspfad für hochradioaktive Abfälle zu berücksichtigen ist. Hierbei stellt die Konditionierung der Abfälle für die Endlagerung die entscheidende Schnittstelle zwischen der Zwischen- und Endlagerung dar. Alterungsprozesse ausgedienter Brennelemente, die langfristig zu einer Abnahme der Brennstabintegrität und damit zu einer signifikanten Einschränkung der Handhabbarkeit der Brennstäbe führen können, werden durch eine Versprödung des Brennstabhüllrohrs,

durch (strahlen-) chemische Wechselwirkungen an der Hüllrohr-Brennstoff-Grenzfläche sowie durch das Strahlenfeld des Kernbrennstoffs verursacht. Ein Versagen der Hüllrohre bestrahlter Brennstäbe wird während der Zeitdauer der auf vierzig Jahre befristeten Aufbewahrungsgenehmigungen nicht erwartet. Da sich Alterungsprozesse während der notwendigen verlängerten Zwischenlagerung fortsetzen, kann ein Hüllrohrversagen nicht dauerhaft ausgeschlossen werden. Im Unterschied zur Zwischenlagerung ausgedienter Brennelemente sind für die Zwischenlagerung verglaster hochradioaktiver Abfälle in Transport- und Lagerbehältern bisher keine Prozesse bekannt, die im Verlauf von Jahrzehnten sicherheitsrelevante Alterungsschäden erwarten lassen.

Die ersten Zwischenlager wurden in den 1980er Jahren nach den damals allgemein anerkannten Regeln der Technik für eine Lebensdauer von 50 Jahren bemessen. Da diese Bauwerkslebensdauer von der aktuell notwendigen Zwischenlagerungsdauer überschritten werden kann, muss bei einer Neugenehmigung der Zustand der Gebäude genauer geprüft werden. Die Gebäude sind ein wichtiger Bestandteil der baulichen Schutzmaßnahmen zum sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe. Sie sind aus Stahlbeton errichtet. Bei richtiger nutzungsspezifischer Bemessung sowie guter Qualität der Ausgangsstoffe und Bauausführung besitzt Stahlbeton gute Dauerhaftigkeitseigenschaften, die jedoch durch die Korrosion der Stahlbewehrung und des Betons beeinträchtigt werden können. Bei der Stahlkorrosion im Beton führen chemische und physikalische Alterungsprozesse dazu, dass der Bewehrungsstahl nicht mehr vor Korrosion geschützt ist. Setzt dann die Korrosion ein, kommt es zu Rissen und Abplatzungen, die zu einer reduzierten Tragfähigkeit führen können. Die Zwischenlagerbauwerke können dann extremen Einwirkungen wie Hochwasser, Erdbeben, Brand und Flugzeugabstürzen nicht mehr standhalten. Durch wiederkehrende Prüfungen wird aktuell sichergestellt, dass die Tragfähigkeit der Gebäude gewährleistet ist. Alternativ können die Bauwerke mit Hilfe von Sensoren und Messtechnik kontinuierlich überwacht werden und die Daten können zur Prognose der weiteren Zustandsentwicklung genutzt werden. Somit wird ein ständiger Vergleich der Einwirkungen mit den Widerstandswerten ermöglicht. Diese sogenannte adaptive Lebensdauerprognose ist ein hilfreiches Instrument zur Bewertung der Zwischenlagerbauwerke und bietet die Möglichkeit Instandsetzungsmaßnahmen oder auch den Abriss und Neubau von Zwischenlagerbauwerken rechtzeitig zu planen und die Kosten dafür zu optimieren.

1. Einleitung

Stand heute ist noch nicht absehbar, wie lange die Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen und anderen hochradioaktiven Abfällen tatsächlich erforderlich sein wird. Der vom Standortauswahlgesetz angestrebte Termin, bis 2031 einen Endlagerstandort auszuwählen, wurde mittlerweile von Seiten der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) als nicht erreichbar bewertet. Szenarien der BGE benennen 2046 bzw. 2068 als mögliche Termine, sie berücksichtigen darin aber noch nicht die zeitlichen Bedarfe anderer Akteure wie die Prüfaufgaben des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) oder die Gesetzgebungsverfahren des Bundes. Diese wurden im Rahmen eines Vorhabens zur Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens mit der Kurzbezeichnung PaSta (Krohn et al. 2024) analysiert. Im Ergebnis ist bei einem idealen Verlauf erst 2074 ein Endlagerstandort ausgewählt.

Zwischenlagerung wird auch nach dem Standortauswahlverfahren, nämlich während der Planung, des Genehmigungsverfahrens und des Baus eines Endlagers erforderlich. Auch die Betriebszeit des Endlagers, die Verpackung in Endlagerbehälter und die Einlagerung in das Endlager wird ca. 30 bis 50 Jahre in Anspruch nehmen. Bis zur Abgabe des letzten Behälters an die Verpackungsanlage wird also eine geringer werdende Anzahl an Behältern zwischengelagert werden. Die Entsorgungskommission (ESK) schätzt in ihrem Positionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung (ESK 2023b) Zwischenlagerzeiten von bis zu 120 Jahren ab. Der Zeitstrahl in Abbildung 1 verdeutlicht die Abhängigkeit der Zwischenlagerung von der Verfügbarkeit eines Endlagers.

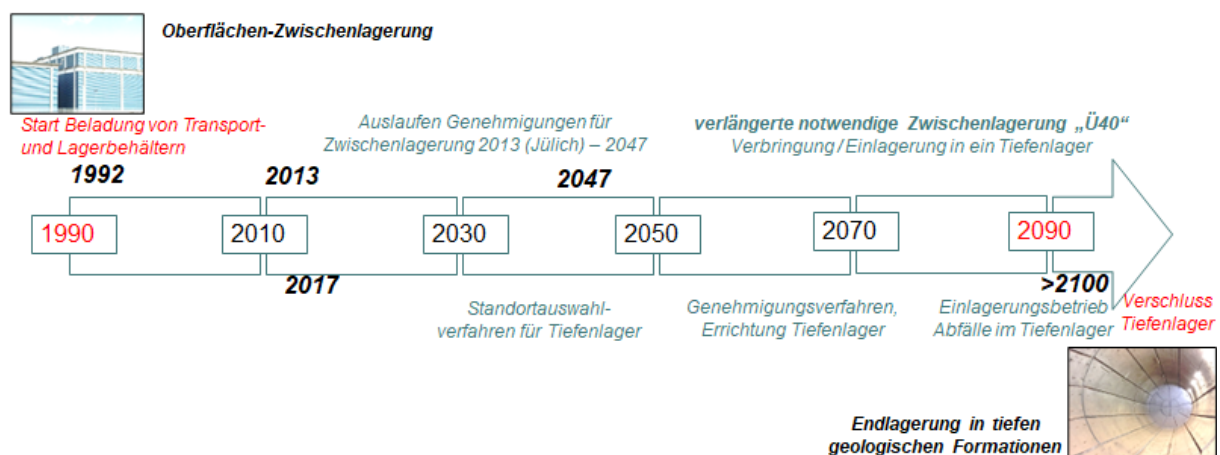


Abbildung 1: Zeitstrahl: Dauer der Zwischenlagerung bis zum Abschluss der Einlagerung in ein Endlager (Quelle: KIT-INE)

Die Zwischenlagereignisse sind gemäß § 6 Absatz 5 des Atomgesetzes (AtG) auf 40 Jahre befristet, beginnend mit der Einlagerung des ersten Transport- und Lagerbehälters (TLB). Der Tabelle 1 ist zu entnehmen, wann die Genehmigung des jeweiligen Zwischenlagers endet. Der Zeitraum bis zur Endlagerung wird damit nicht abgedeckt.

Tabelle 1: Kenndaten von Zwischenlagern für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle in Deutschland

Standort	Gelagerte Menge Stand 31.12.2023 in Tonnen Schwermetall	Genehmigt bis
Lagerbecken		
Kernkraftwerke (gesamt)	1896	Nicht begrenzt
Dezentrale Zwischenlager		
Biblis (BZB)	987	2046
Brokdorf (BZF)	486	2047
Brunsbüttel (KKB)	161	(2)
Grafenrheinfeld (BZR)	509	2046
Grohnde (BZD)	497	2046
Gundremmingen (BZM)	1097	2046
Isar (BZI)	821	2047
Krümmel (BZK)	353	2046
Lingen/Emsland (BZL)	455	2042
Neckarwestheim (BZN)	790 ⁽¹⁾	2046
Philippsburg (BZP)	940	2047
Unterweser (BZU)	368	2047
Zentrale Zwischenlager		
Gorleben (BZG)	39	2034
Ahaus (BZA)	63	2036
Rubenow	585	2039
AVR-Behälterlager		
Jülich	0,086	(3)

(1) Einschl. der 96 Tonnen Schwermetall aus dem KKW Obrigheim

(2) Genehmigung durch Gerichtsbeschluss seit 2015 unwirksam

(3) Anordnung zur Räumung des Behälterlagers des «Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich» (AVR) am 2.7.2014 erlassen

Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Joint Convention Berichts für die Überprüfungskonferenz 2025 (BMU 2024)

Ergänzend ist festzuhalten, dass auch jeder Transport- und Lagerbehälter jeweils für 40 Jahre ab Verschluss des Behälters genehmigt ist. Entsprechend läuft die erste Behältergenehmigung bereits 2032 aus. Eine Verlängerung der Zwischenlagerung „darf nur aus unabweisbaren Gründen und nach der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen“ (AtG 1959).

In diesem Bericht befassen sich die Autorinnen und Autoren mit der Fragestellung, welche Aspekte im Hinblick auf neue Genehmigungen der Zwischenlager nach 40 Jahren Betriebszeit bewertet werden müssen: Kapitel 2 befasst sich mit der Aufbewahrung und den für die Zwischenlagerung verwendeten Behältern. In Kapitel 3 werden Aspekte des Inventarverhaltens betrachtet insbesondere auch im Hinblick auf die Schnittstelle zur Endlagerung. Das Kapitel 4 umfasst Themen des Zwischenlagergebäudes. In Kapitel 5 wird auf die Öffentlichkeitsbeteiligung im Hinblick auf die verlängerte Zwischenlagerung eingegangen. Der Bericht schließt mit einem Fazit in Kapitel 6. In diesem Bericht nicht näher betrachtet wird das Thema Kompetenzerhalt des Personals und Wissensmanagement, das aus Sicht der Autorinnen und Autoren im Rahmen von Neugenehmigungen aber ebenfalls berücksichtigt werden muss.

In den Kapiteln wird auf das bestehende Zwischenlagerkonzept der trockenen Zwischenlagerung an 16 Standorten in Transport- und Lagerbehältern fokussiert. Auf lange Sicht wären prinzipiell auch andere Varianten wie die nasse Zwischenlagerung oder das Zusammenlegen von Zwischenlagern (konsolidierte Zwischenlagerung) denkbar. Diese würden aber weitere Herausforderungen wie z. B. eine Standortsuche, zusätzliche Transporte, bei einer Nasslagerung einen Transfer der Behälterinventare aus den Transport- und Lagerbehältern in ein neu zu schaffendes Wasserbecken mit umfangreicher Infrastruktur etc. nach sich ziehen, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

2. Aufbewahrung und Behälter

Schutzziele

Aus der ESK-Leitlinie für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern ergeben sich die folgenden zu betrachtenden Schutzziele (ESK 2023a):

- sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe,
- sichere Abfuhr der Zerfallswärme,
- sichere Einhaltung der Unterkritikalität und
- Vermeidung unnötiger Strahlenexposition, Begrenzung und Kontrolle der Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung“ (ESK 2023a).

Dadurch ergeben sich Anforderungen an technische und bauliche Einrichtungen, wie die Abschirmung der ionisierenden Strahlung oder die regelmäßigen Prüfungen und die ordnungsgemäße Instandhaltung (ESK 2023a).

Behälterfunktionen und prinzipieller Aufbau

Die Betrachtung der Überschreitung der auf 40 Jahre ab dem Zeitpunkt der Einlagerung befristeten Genehmigungsdauer der Transport- und Lagerbehälter (TLB) (AtG 1959) muss technisch im Hinblick auf zwei wesentliche Funktionsziele erfolgen. Zuerst ist zu prüfen, ob der sichere Einschluss der Radionuklide und die Kritikalitätssicherheit auch über den Genehmigungszeitraum hinaus gewährleistet werden kann. Zweitens ist eine wesentliche, aufrecht zu erhaltende Funktion des TLB die Transportfähigkeit zum Endlagerstandort zur dortigen weiteren endlagergerechten Konditionierung (ESK 2023a).

In diesem Kapitel geht es daher um die Frage, ob das technische System des TLB auch weiterhin, über die Genehmigungsdauer von 40 Jahren hinaus alle Radionuklide sicher im Inneren des Behälters in einer unterkritischen Konfiguration halten kann. Dieser Nachweis ist erforderlich, da für den Behälter die Genehmigungen nach § 6 AtG auf 40 Jahre bezogen auf den einzelnen Behälter ab dessen Erstbeladung (Verschluss des Primärdeckels) befristet sind, dieser Genehmigungszeitraum aber perspektivisch durch die Dauer des Endlagerforschungsprozesses und die damit verbundene Verlängerung der Zwischenlagerungsperiode überschritten wird. Beginnend mit dem CASTOR®-THTR/AVR im Brennelemente-Zwischenlagers Ahaus (BZA) und AVR-Behälterlager Jülich im Jahr 2032 erlöschen die Genehmigungen für die Behälter in den nachfolgenden Jahren, wovon viele Zwischenlagerstandorte betroffen sind (ESK 2023b). Die Veränderungen des Inventars über den Lagerungszeitraum spielt bei den Betrachtungen in diesem Kapitel keine Rolle und werden im folgenden Kapitel diskutiert. Ausgehend von diesen Betrachtungen wird erörtert unter welchen Randbedingungen der TLB nach Ablauf der verlängerten Zwischenlagerung zum Endlagerstandort verbracht werden kann.

Sämtliches hochradioaktives und wärmeentwickelndes Inventar wird nach der Nasslagerung im Abklingbecken in Deutschland zur Zwischenlagerung in Transport- und Lagerbehältern der CASTOR®-Familie¹ verpackt und zwischengelagert (siehe Abbildung 2). Dabei

¹ CASTOR ... **C**ask for **S**torage and **T**ransport of **R**adioactive Material

unterscheiden sich die Behältertypen aufgrund des nationalen Inventarportfolios, was im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Formen der Brennelemente der PWR-, BWR- und VVER-BE und Forschungsreaktoren sowie den Kokillen aus der Wiederaufarbeitung resultiert.

Dies TLB-Behälterart besteht aus einem gusseisernen, dickwandigen Grundkörper, in welchem die Abfallstoffe entsprechend ihrer Form- und Gestalt in sogenannten Tragkörben fixiert eingestellt sind. Durch ein Doppeldeckelsystem, bestehend aus einem Primärdeckel und einen Sekundärdeckel werden die Behälter verschlossen (Wimmer et al. 2015). Die Deckel werden dabei aufgeschraubt und mit Spezialdichtungen wird sichergestellt, dass ein Inventaraustritt verhindert wird. Die Deckel der TLB bestehen aus einem hochlegierten Edelstahl (Edelstahltyp mit der Werkstoffnummer 1.4313) (Wolf et al. 2012). Die Dichtheit wird durch ein spezielles Dichtungssystem erreicht, welches im Wesentlichen als eine doppelt metallummantelte Spiralfeder bezeichnet werden kann. Diese Doppelmantelmetall-dichtungen werden als Komponente des Verschlusssystems in allen Transport- und Lagerbehältern verwendet (Schubert et al. 2009).

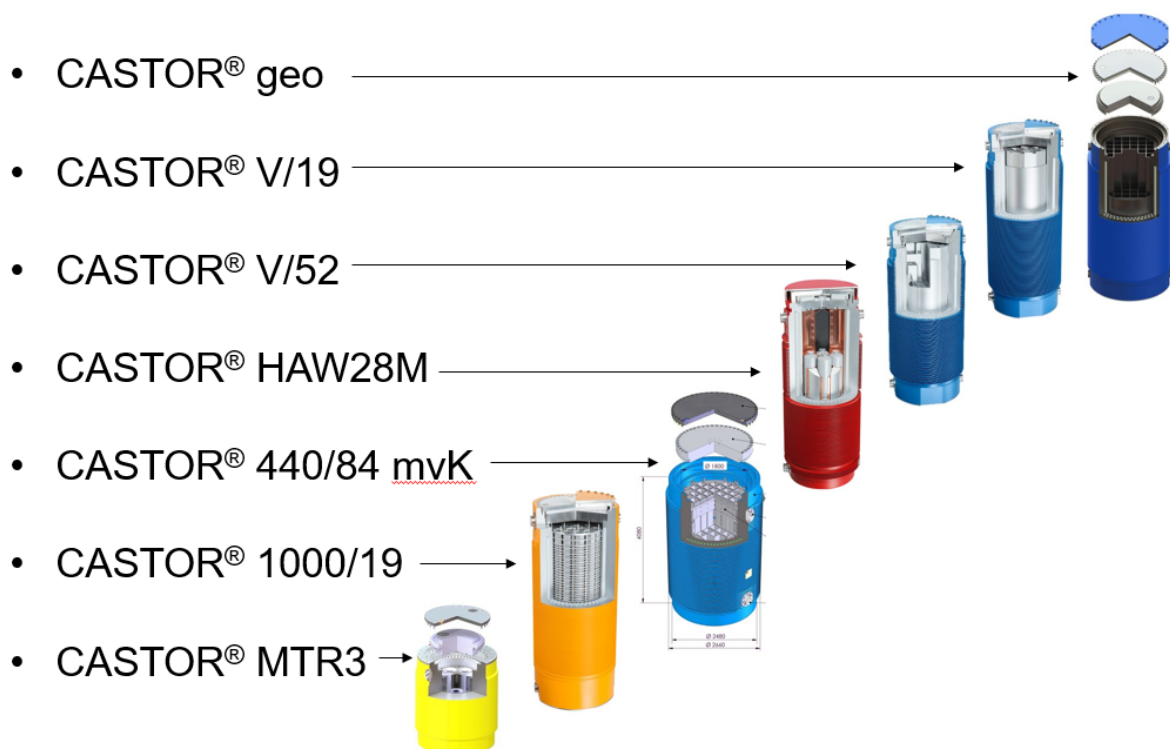


Abbildung 2: Überblick über die Vielfalt von ca. 90% der TLB-Varianten in Deutschland bestehend aus der CASTOR®-Familie² der GNS in Deutschland (eigene Darstellung auf Basis der Produktdatenblätter der GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (www.gns.de)) (ca. 10 % der Zwischenlagerbehälter entfallen auf den Typ TN® der Firma Orano NPS mit der Bezeichnung TN 24 E – hier nicht abgebildet)

Die Dichtungen werden in Deckelflanschnuten eingesetzt und komprimiert. Die Konfiguration der Doppelmantelmetalldichtungen besteht aus einer kreisförmigen Spiralfeder, die von zwei Metallmänteln umhüllt ist. Das äußere Material besteht normalerweise aus Aluminium oder Silber und das Innere aus rostfreiem Stahl. Diese Art von Metalldichtung

² <https://www.gns.de/behaelter-equipment/brennelemente-haw/referenzen/> abgerufen am 31.07.2024

funktioniert, indem der Außenmantel bei der Montage des Deckels durch die erzeugten Vorspannkräfte plastisch verformt wird.

Aufgrund der höheren Verformbarkeit des Außenmantels im Vergleich zum Innenmantelmaterial passt sich der Außenmantel sehr gut der Struktur der Dichtflächen an. Der Innenmantel bewirkt, dass die durch die Kompression erzeugte Druckkraft der Spiralfeder gleichmäßig auf den Außenmantel verteilt wird. Diese Konfiguration zeigt eine hohe Dichtqualität. Für metallische Dichtungen in Transport- und Lagerbehältern ist eine Standard-Heliumleckrate $Q_{\text{He/St}}$ von ($1028 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ nach der Deckelmontage) spezifiziert (Schubert et al. 2009).

Für die Erfüllung der Langzeitfunktionen sind demnach die Dichtungssysteme bei der Langzeitzwischenlagerung der wichtigste „Bottleneck“ (Engpass), was auch im Wesentlichen die Genehmigungsdauer der 40 Jahre begründet. Zur dauerhaften Überprüfung der Dichtheit wird im Deckelsystem der CASTOR®-Behälter ein Druckschalter verbaut. Dieses System lässt sowohl ein Versagen der Primärdeckeldichtung, als auch ein Versagen der Sekundärdeckeldichtung erkennen, indem der Druck (6 bar Helium) im sogenannten Sperrraum zwischen Primär- und Sekundärdeckel überwacht wird. Meldeereignisse werden automatisiert an ein Überwachungssystem übertragen, an welches alle zwischengelagerten CASTOREN® angeschlossen sind. Aktive Sicherheitseinrichtungen sind an den TLB nach § 6 AtG nicht vorhanden. Da Teile des Druckschalters zur dichten Umschließung gehören sind Auslöseereignisse unter Anwendung der Meldekriterien in den Einrichtungen zur Aufbewahrung meldepflichtig (AtSMV 1992). Die Selbstüberwachung ist bisher zwei Mal ausgelöst worden (1. Im Zwischenlager Isar (BZI) 14.12.2021; 2. im Zwischenlager Phillipsburg (BZP) 14.07.2022), wobei die Ursache immer ein defektes Bauteil im Überwachungssystem war und die Dichtheit der Deckelsysteme zweifelsfrei und uneingeschränkt gegeben war³.

Für das Eintreten einer Undichtigkeit entweder im Primär- oder im Sekundärdeckelsystem aufgrund des Versagens der Dichtungen sind spezielle Maßnahmen vorgesehen, durch welche die Lager- und Transportfähigkeit der TLB wiederhergestellt wird. Versagt die äußere Dichtung am Sekundärdeckel, so kann der Deckel abgenommen, die Dichtung ersetzt und der Deckel wieder montiert werden. Diese Maßnahme ist in jedem Zwischenlager ohne die Notwendigkeit einer sogenannten „Heißen Zelle“ möglich und durch die Funktionserfüllung der Primärdeckeldichtung wird der hermetische Verschluss und die Verhinderung eines Nuklidaustrages gewährleistet⁴.

Versagt die innere Dichtung am Primärdeckel, so stellt zunächst die Sekundärdeckeldichtung den sicheren Nuklideinschluss sicher. Um das Prinzip der doppelten Barriere wieder zu erreichen, wird in diesem Fall ein sogenannter Fügedeckel auf der Behälteroberseite installiert. Dieser Deckel wird über den Sekundärdeckel positioniert und vollständig mit einer stoffschlüssigen Dichtnaht mit dem Behälterkörper verschweißt, sodass eine dichte Umschließung erreicht wird. Im Fügedeckel ist ein Drucküberwachungssystem installiert (Druckschalter) und es bleibt ein Zwischenraum zwischen Sekundär- und Fügedeckel frei, sodass das Überwachungssystem gleichwertig zum System Primär- und Sekundärdeckel

³ <https://bgz.de/?s=selbst%C3%BCberwachung> abgerufen am 29.07.2024

⁴ <https://bgz.de/2018/03/09/neu-fragen-und-antworten-zur-sicheren-zwischenlagerung/> abgerufen am 31.07.2024

angesehen werden kann. Damit erreicht der Zustand des Behälters wieder die notwendigen Voraussetzungen für die Zwischenlagerung und die Transportfähigkeit⁵.

Die im Zwischenlager stehend angeordneten Behälter sind zur Neutronenmoderation mit Abschirmmaterialien aus Polyethylen (PE) ausgestattet. Dazu ist eine mehrere Zentimeter dicke PE-Platte zwischen Primär- und Sekundärdeckel installiert. Ebenso ist im unteren Bereich des zylindrischen Behälterkorpus eine PE-Platte zwischen Gusseisenkorpus und der Abschlussplatte aus hochlegierten Stahl eingebaut. Die Neutronenmoderation an der Mantelfläche wird je nach Behälterbauart ebenfalls durch Polyethylen sichergestellt, welches in axialen Langlochbohrungen in der Behälterwand integriert ist (Neumann 2017). Beispielsweise sind beim CASTOR® V/19 107 Bohrungen in zwei Bohrkreisen mit einem Bohrungsdurchmesser von 80 mm und einer Länge von ca. 4600-4950 mm pro Bohrung mit PE gefüllt. Damit sind zwischen 2,5 und 3 m³ Polyethylen (Masse ca. 2,3-2,9 Tonnen) in der Wandung des TLB integriert, was den zeitlich begrenzten Zugang durch das verantwortliche Personal im Zwischenlager, z.B. zur Inspektion und Überwachung, mit reduzierter Strahlenbelastung ermöglicht.

Beständigkeit des TLB im Zwischenlager

Das in Deutschland ausschließlich zur Anwendung kommende Zwischenlagerkonzept ist das Konzept des Trockenlagers mit einer passiven Naturzugkühlung. Unterschiede in den Varianten der Zwischenlager finden sich dabei nur in der baulichen Umsetzung. Die Behälter werden dabei immer stehend mit einem entsprechenden Abstand zueinander zur Lagerung positioniert. Die Abführung der Zerfallswärme erfolgt dabei über die Wärmeleitung vom wärmeentwickelnden Inventar im Inneren des Behälters zur Außenseite des TLB. Bei hoher Wärmeleistung des Inventars wird durch außenliegende Kühlrippen die Behälteraußenfläche eine vielfach größere Oberfläche bezogen auf die zylindrische Grundgeometrie des TLB erreicht, sodass eine ausreichende konvektive Wärmeabfuhr ermöglicht wird (Wimmer et al. 2015). Alle Anforderungen zur Funktionserfüllung (Inventareinschluss, Wärmeabfuhr, Kritikalitätssicherheit, Strahlenexposition) sowie der Schutz gegen äußere Einwirkungen (Erdbeben, Explosionsdruckwelle oder Flugzeugabsturz) sind im Genehmigungsverfahren nachgewiesen und für mindestens 40 Jahre bestätigt, sodass die Lagerdauer der TLB auf zurzeit 40 Jahre ab der ersten Einlagerung begrenzt ist.

Für die Dauer der Zwischenlagerung ist eine Aufbewahrungsgenehmigung nach § 6 AtG erforderlich und für eine durchgehend mögliche Abtransportierbarkeit der TLB ist außerdem eine verkehrsrechtliche Zulassung des Behälters erforderlich (Bauartzulassung als Versandstück Typ B (U)).

Die verkehrsrechtliche Zulassung ist bisher auf 3 bis 5 Jahre, in Ausnahmefällen auf 10 Jahre befristet. Sie wird regelmäßig erneuert, um den Abtransport gewährleisten zu können. Grundlage ist das Verkehrsrecht (basierend auf internationalen Vorgaben).

Während der genehmigten Betriebszeit von 40 Jahren werden Betriebserfahrungen gesammelt, z. B. werden periodische Sicherheitsüberprüfungen (PSÜ) alle 10 Jahre durchgeführt. Ein Alterungsmanagement gibt es sowohl hinsichtlich der Aufbewahrung (ESK 2023a) als

⁵ <https://rueckfuehrung.bgz.de/reparaturkonzept-und-abtransportierbarkeit/> abgerufen am 31.07.2024

auch hinsichtlich des Transports (BAM 2022). Alterungsmanagement und Alterungsüberwachung sollen einen technisch sicheren Zustand des Behälters und seiner Komponenten zu jeder Zeit sicherstellen. Zu berücksichtigen sind aber auch nichttechnische Aspekte wie z. B. neue Regelwerksanforderungen oder neue Anforderungen zur Nachweisführung, die spätestens für die Zulassung zum Abtransport zum Tragen kommen können.

Aufgrund aller Entscheidungen zum Umgang mit der Kerntechnik in Deutschland muss die Zwischenlagerung zwingend so lange sicher gewährleistet werden, bis ein Endlagerstandort gefunden ist und das Endlager zur Einlagerung der Abfälle zur Verfügung steht. Ein Umsteuern in diesem Ablauf z.B. mit (Neu)-Genehmigungsverfahren für die bestehenden TLB oder Umladungsprozesse der Abfälle in neue TLB stehen derzeit nicht als realistische Alternativen zur Verfügung. Daher muss das Zwischenlager in seiner Gesamtheit (Gebäude, Behälter, Inventar) ggf. in einer Weise ertüchtigt werden, dass eine Genehmigungsverlängerung erteilt werden kann. Hierbei ist die Zeit für die Zwischenlagerung ein sicherheitsrelevanter Faktor. Für den Behälter selbst gibt es unter den Bedingungen der Zwischenlagerung neben dem Ausfall der Dichtfunktion keine weiteren Szenarien, welche eine verlängerte Zwischenlagerung nicht ermöglichen würden. Technisch, z. B. in Hinblick auf eine mögliche Korrosion des Behälters, spielen Zeithorizonte von bis zu 100 Jahren insofern keine Rolle, da unter den definierten Bedingungen im Zwischenlager keine korrosionsbedingte Schädigung des TLB zu erwarten ist. Die passive Naturzugkühlung und die sehr gut definierten klimatischen Bedingungen im Zwischenlager sowie die ständige Überwachung der TLB in Bezug auf korrosive Schäden sichern dabei die Funktion des TLB auch über die begrenzte Genehmigungsperiode hinaus. Auch die Anforderungen an die außergewöhnlichen Szenarien bieten keinen Ansatz an der Funktionsfähigkeit der TLB zu zweifeln. Im Verfahren der Schweiz wird dazu beispielsweise die Anforderung zur Langzeitverwendung auch eine Mindestbetriebszeit für die TLB von 40 Jahren gefordert aber die Genehmigung auf diesen Zeitraum nicht begrenzt⁶.

Dies wird ebenfalls durch die rechtliche Auslegung durch eine Klage gegen die Aufbewahrungsgenehmigung für das Zwischenlager Gorleben durch ein Urteil vom 08.04.2024 (Az. 22A17.40026) gestützt. Dort wird weder das Reparaturkonzept des Aufschweißens eines Fügedeckels, welches den Aufbewahrungsgenehmigungen zugrunde liegt, beanstandet. Noch wird daran gezweifelt, dass dieses Reparaturkonzept außerhalb einer „Heißen Zelle“ ausgeführt werden kann. Vielmehr enthält das Urteil zusätzlich zum Einzelfall wegweisende Hinweise in Richtung der notwendigen Genehmigungsverlängerungen durch die Bestätigung des gesamten Konzeptes der trockenen Zwischenlagerung. Damit kann ein valider Rechtsrahmen neben den technisch umsetzbaren Szenarien für eine Erweiterung der Zwischenlagergenehmigungen über die bisherigen 40 Jahre hinaus verwirklicht werden (Leidinger 2024, VGH München 2024).

Aus Sicht der Behältertechnik ist also im Hinblick auf die Erhaltung der den Behälter betreffenden Schutzziele:

- sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe,
- sichere Abfuhr der Zerfallswärme,

⁶ Richtlinie ENSI-G05/deutsch (Original): Auslegung und Fertigung von Transport- und Lagerbehältern für die Zwischenlagerung; Kap.: 4.2.6 Langzeitverwendung; S. 4

- Vermeidung unnötiger Strahlenexposition, Begrenzung und Kontrolle der Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung“ (ESK 2023a),

zu erwarten, dass diese vollumfänglich auch nach 40 Jahren erfüllt werden und damit die notwendige Verlängerung der Zwischenlagerperiode über die Genehmigungsdauer hinweg sichergestellt werden kann.

3. Inventarverhalten und Schnittstelle zur Endlagerung

Betrachtete Inventare hochradioaktiver Abfälle

Das Inventar hochradioaktiver Abfälle (HAA), das derzeit in Deutschland in Zwischenlagern und innerhalb der Kernreaktoren aufbewahrt wird, summiert sich auf eine Aktivität von $2 \cdot 10^{20}$ Becquerel (BMUV 2023). Dieses Radionuklidinventar besteht aus Uran, Plutonium, weiteren Actiniden, festen und gasförmigen Spalt- und Zerfallsprodukten sowie Aktivierungsprodukten. Die Radionuklide befinden sich eingebunden in verschiedenen Abfallmatrices wie zum Beispiel Urandioxid-, Uran-Plutoniumdioxid-Kernbrennstoff oder Borosilikatglas. Der Großteil dieses Inventars besteht aus ausgedienten Urandioxid-Brennelementen von Druckwasserreaktoren (DWR) und Siedewasserreaktoren (SWR) westdeutscher Kernkraftwerke sowie ausgedienten Plutonium-Uran-Mischoxid-Brennelemente dieser Reaktoren und ausgedienten Brennelemente von DWR ostdeutscher Kernkraftwerke (sogenannten Wasser-Wasser-Energie-Reaktoren, WWER). Ungefähr ein Drittel des HAA-Inventars besteht aus verglasten Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente. Diese als HAA-Gläser (HAW-Gläser oder CSD-V Abfälle) bezeichneten Abfälle befinden sich in verschweißten Edelstahlkokillen (Abbildung 3).

Die verglasten hochradioaktiven Abfälle und die meisten der ausgedienten Brennelemente werden in TLB der CASTOR® Produktfamilie aufbewahrt (siehe Abbildung 2). So befinden sich jeweils 19 DWR-Brennelemente in einem CASTOR V/19, 52 SWR-Brennelemente in einem CASTOR V/52 und 28 HAA-Kokillen in einem CASTOR HAW28M. Weniger als 22% der Brennelemente befinden sich noch in Wasserbecken innerhalb der Kernreaktoren (BMUV 2023). Nach und nach sollen auch die sich noch in der „Nasslagerung“ befindlichen Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern (TLB) geladen und anschließend aus den Reaktoren heraus in Zwischenlager transportiert werden.

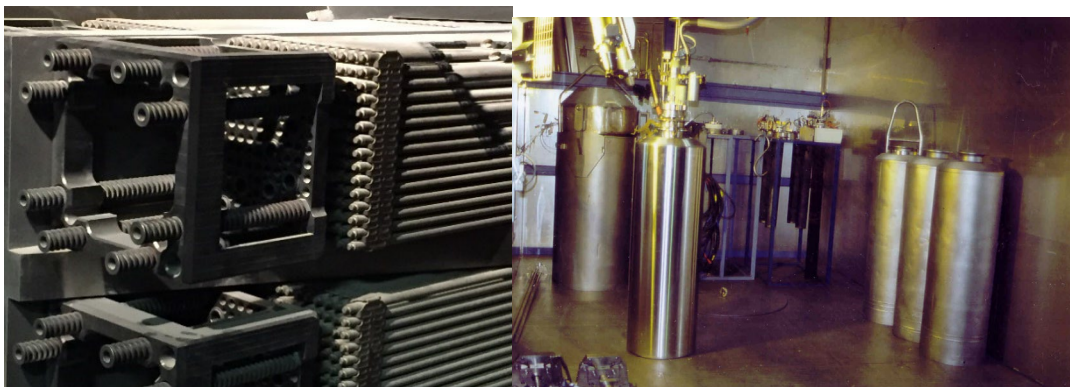


Abbildung 3: Modell eines Druckwasserreaktor-Brennelements (links). Edelstahlkokillen mit simuliertem HAA-Glasprodukten (rechts). (Quelle: V. Metz, KIT-INE)

Im Vergleich zur Gesamtmenge von etwa knapp zehntausend Tonnen Schwermetallmasse (s. Tabelle 1) Brennelemente der oben erwähnten Leistungsreaktoren stellen die abgebrannten Kernbrennstoffe aus Forschungs- und Prototypreaktoren mit einer Gesamtmenge von weit weniger als einhundert Tonnen einen sehr kleinen Anteil des HAA-Inventars dar (BMUV 2023). Die hochradioaktiven Abfälle aus den Prototyp- und Forschungsreaktoren

THTR und AVR umfassen Uranoxid, Thoriumoxid oder carbidische Materialien als Kernbrennstoff sowie Graphit als Moderator. Bei den hochradioaktiven Abfällen aus Forschungsreaktoren in Karlsruhe, FRM2, Rossendorf, RFR, Berlin, BER2, und Mainz, FRMZ, und anderen Forschungsreaktoren handelt es sich um bestrahlte Kernbrennstoffe mit Uran oder Plutonium in Form von Oxiden, Siliziden oder als Uran-Aluminium-Legierungen. Aufgrund ihres relativ geringen Inventars von weniger als 1% des Gesamtinventars (BMUV 2023) werden in diesem Bericht die HAA aus Forschungs- und Prototypreaktoren als nachgeordnet betrachtet und nur am Rande behandelt.

Bedeutung des Inventarverhaltens für die Zwischenlagerung und die Schnittstelle von der Zwischen- zur Endlagerung

Für das Kernbrennstoff-Inventar aus Leistungsreaktoren ist über die gesamte Zwischenlagerungszeit die sichere Lagerung und die sichere Beförderung (währenddessen der sichere Einschluss), sowie im Anschluss daran die sichere Handhabung und für den gesamten Zeitraum die sichere Aufrechterhaltung der Unterkritikalität zu gewährleisten (ESK 2015; ESK 2023a). Innerhalb der TLB sind die festen und gasförmigen Radionuklide weitgehend in ihren jeweiligen Abfallmatrizes eingeschlossen und werden von gasdichten Hüllrohren und anderen Strukturteilen bzw. Edelstahlkokillen umschlossen. Neben dem Einschluss der Radionuklide soll durch diese und andere Bauteile die Position und geometrische Anordnung der hochradioaktiven Abfälle innerhalb der TLB erhalten bleiben (ESK 2023a). Insbesondere für spaltbare Radionuklide wie beispielsweise das Uranisotop U-235 oder die Plutoniumisotope Pu-239 und Pu-241 ist unter anderem die Beibehaltung der Position und geometrischen Anordnung von Bedeutung, um eine Rekritikalität auszuschließen.

Die Integrität der Hüllrohre, Edelstahlkokillen und anderen Strukturteile ist nicht nur für die Zwischenlagerung an sich, sondern insbesondere für die Handhabung, den Transport und eine Konditionierung bzw. Umlagerung der HAA-Inventare aus den TLB heraus und hinein in die Endlagerbehälter von Bedeutung (ESK 2015; ESK 2023a). Die Konditionierung stellt die entscheidende Schnittstelle zwischen der Zwischen- und Endlagerung dar.

Sicherheitstechnisch ist die Integrität bzw. Dichtigkeit der derzeit verwendeten TLB nur für eine begrenzte Zeitspanne nachgewiesen. Es ist ungewiss, wie lange diese Integrität jenseits der bisher vorgesehenen vierzig Jahre Zwischenlagerung weiter gewährleistet werden kann (siehe Kapitel 2 Aufbewahrung und Behälter). Über eine Zeitspanne von vielen Jahrzehnten wird die Abnahme der Integrität bzw. Handhabbarkeit von Behälterinventaren erwartet; insbesondere durch Alterung der Brennelemente im eigenen Strahlungsfeld, Versprödung und Korrosion der Hüllrohre (ESK 2015; Marchetti et al. 2022).

In unserem Bericht wird als wahrscheinliche Entwicklung davon ausgegangen, dass im Verlauf einer verlängerten Zwischenlagerung die TLB ihre Schutzfunktionen vollumfänglich gewährleisten und bei keinem der TLB signifikante Schäden auftreten, die das Verschweißen des TLB-Doppeldeckelsystems bzw. den Einsatz eines aufzuschweißenden Deckels („Fügedeckels“) veranlassen würden. Für eine solche Entwicklung ist davon auszugehen, dass im Anschluss an die Zwischenlagerung alle TLB oder zumindest die überwiegende Anzahl der TLB geöffnet werden, um die Inventare mit abgebrannten Kernbrennstoffen und HAA-Kokillen aus den TLB zu entnehmen, diese Inventare gegebenenfalls einer weiteren

Konditionierungsbehandlung zu unterziehen und im letzten Arbeitsschritt in geeignete Endlagerbehälter einzuladen (ESK 2023a). Hierbei ist zu beachten, dass das Inventar eines TLB auf mehrere Endlagerbehälter verteilt werden muss. Zur Orientierung werden auf vier Beispiele verwiesen: In der Schweiz soll an der Schnittstelle von der Zwischen- zur Endlagerung das Inventar eines CASTOR V/19 auf mehr als vier, das Inventar eines CASTOR V/52 auf mehr als fünf und das Inventar eines CASTOR HAW28M auf mehr als vier Endlagerbehälter verteilt werden (Johnson et al. 2002). In der Vergangenheit wurde in Deutschland vorgesehen, bei der Umlagerung ausgedienter Brennelemente aus den TLB in Endlagerbehälter jeweils zehn DWR-Brennelemente in einem Endlagerbehälter vom Typ POL-LUX® einzulagern (Saurí et al. (2017)).

Im Konzept „Direkte Einlagerung in Zwischenlagerbehältern“ (Chernykh et al. 2011; Filbert et al. 2011; Graf et al. 2010); Graf et al. 2012) wurde betrachtet, dass Kernbrennstoff aus Leistungsreaktoren direkt in den Transport- und Lagerbehältern in einem geologischen Endlager eingelagert werden sollen. Damit wäre eine Umlagerung des Inventars von TLB in Endlagerbehälter nicht erforderlich. Die Konfiguration der TLB wurde für eine Beladung mit ausgedienten Brennelementen in Reaktoren bzw. mit HAA-Kokillen in Verglasungsanlagen, für den Transport und die Zwischenlagerung der Inventare optimiert, allerdings sind diese Transport- und Lagerbehälter nicht optimiert für die Endlagerung von HAA in einem tiefen geologischen Endlager (Bonano et al. 2018). Auch bei einer sogenannten direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente in TLB müssten die Behälter geöffnet und eine Konditionierung, wie eine Befüllung von Hohlräumen in den TLB mit Magnetit o.a. Materialien zum Kritikalitätsschutz, vorgenommen werden (Filbert et al. 2011; Graf et al. 2012; Hardin et al. 2015). Es ist weiterhin zweifelhaft, ob ein TLB ohne umfangreiche Konditionierungsmaßnahmen, wie eine Ertüchtigung des Korrosionsschutzes oder Bearbeitung der Kühlrippen, gegebenenfalls je nach Endlagerkonzept eine langfristige Integrität in einem geologischen Endlager gewährleisten kann, wie sie von einem Endlagerbehälter erwartet wird.

Für bestimmte ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototypreaktoren sowie Forschungsreaktoren wird die Endlagerung in denjenigen TLB, in denen sie heute bereits verpackt und zwischengelagert sind, erörtert. So wird in einer Studie aus dem Jahr 2023 die Endlagerung ausgedienter Brennelemente des Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktors in CASTOR® THTR vorgesehen (BGE-TEC 202). Für ausgediente Brennelemente aus den Forschungsreaktoren RFR, FRM2, BER2 und FRMZ ist geplant, dass diese in CASTOR® MTR 2 bzw. CASTOR® MTR 3 zwischengelagert und anschließend in einem Tiefenlager endgelagert werden sollen.

Einfluss von Alterungsprozessen auf die Integrität des Inventars

Eingangs wurde darauf hingewiesen, dass bei Zwischenlagerung, Transport, Handhabung, und Entladung des Inventars aus den TLB heraus die Struktur der Komponenten, welche die im Inventar enthaltenen Radionuklide einschließen und seine geometrische Anordnung bestimmen, erhalten bleiben muss. Dies ist besonders relevant für das Inventar ausgedienter Brennelemente. Erhebliche Schädigungen der Hüllrohre und Strukturteile von Brennstäben durch Korrosion und andere Prozesse des Hüllrohrversagens sind auszuschließen (ESK 2015; ESK 2023a).

Während des Leistungsbetriebs im Reaktor erfolgen chemische Reaktionen zwischen den Hüllrohren und dem Kühlwasser bzw. zwischen den Kernbrennstoffen und den Hüllrohren, durch die nicht-stöchiometrische Zirkoniumhydride und Zirkoniumoxide entstehen. Diese Reaktionen sowie bestrahlungsbedingte Belastungen des Hüllrohrs, die Beanspruchung durch axiale und laterale Strömungskräfte durch das Kühlwasser und die hohen Temperaturen in den Brennstäben führen zu Materialschwächungen in den Hüllrohren. Infolge dieser Beanspruchung verstärkt sich zum einen die Sprödbrechempfindlichkeit der Hüllrohre, zum anderen erhöhte sich das Potential für partielle Lochfraßkorrosion in den Hüllrohren (Billione et al. 2015); IAEA 2003; Sidky 1998, Viswanathan 2014).

In geringer Anzahl entstanden während des Reaktorleistungsbetriebs Schäden an Brennstäben, die zu Verformungen oder Öffnungen der Hüllrohre führten. Zur trockenen Zwischenlagerung solcher defekten Brennstäbe („Defektstäbe“) sind besondere technische Vorkehrungen wie beispielsweise dicht verschlossene Brennstabköcher im Innenraum der TLB vorgesehen (ESK 2015; ESK 2023a).

Abgesehen von diesen Defektstäben wird ein Hüllrohrversagen bestrahlter Brennstäbe während der bisher geplanten vierzig Jahre andauernden Zwischenlagerung nicht erwartet. Zwar kann man davon ausgehen, dass die meisten der chemischen Wechselwirkungen eines Hüllrohrs mit dem Kühlwasser bzw. mit dem Brennstoff während des Leistungsbetriebs bei erhöhter Temperatur im Reaktor stattfanden. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass einige der Reaktionen sich auch im niederen Temperaturbereich ($< 300\text{ °C}$), beziehungsweise durch das langsame Herunterkühlen der Brennelemente im TLB und dem damit verbundenen Temperaturgradienten, während der verlängerten Zwischenlagerung von mehr als vierzig Jahren fortsetzen (Rowold et al. 2018). Über Zeitspannen von vielen Jahrzehnten wird die Abnahme der Integrität der Brennstäbe erwartet, insbesondere durch Alterung der Brennstäbe im eigenen Strahlungsfeld, durch Versprödung und Korrosion der Hüllrohre. Von Relevanz für die Abnahme der Hüllrohrstabilität sind insbesondere die Umorientierung von Zirkoniumhydriden in den Hüllrohren und der Anstieg des mechanischen Drucks auf die Brennstabhülle. Im Kontaktbereich von Hüllrohr und Kernbrennstoff kann es möglicherweise zu einer Korrosion durch volatile Spaltprodukte (z.B. Cäsium-Iod-Verbindungen; Abbildung 4) kommen. Diese Prozesse können zu Spannungsrisskorrosion bzw. Lochfraßkorrosion der Hüllrohre führen (Sidky 1998, Tanaka et al. 2006, Viswanathan 2014).

Im Unterschied zur trockenen Zwischenlagerung ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren sind für HAA-Gläser, die in Edelstahlkokillen innerhalb der TLB aufbewahrt werden, bisher keine Prozesse bekannt, die im Verlauf von Jahrzehnten sicherheitsrelevante Alterungsschäden erwarten lassen (ESK 2015). Daher wird für das Inventar an HAA-Gläsern davon ausgegangen, dass während der Zwischenlagerung sowie einem anschließenden Abtransport und einer Umlagerung der Kokillen mit HAA-Gläsern aus den TLB heraus in Endlagerbehälter keine signifikanten Beeinträchtigungen auftreten werden.

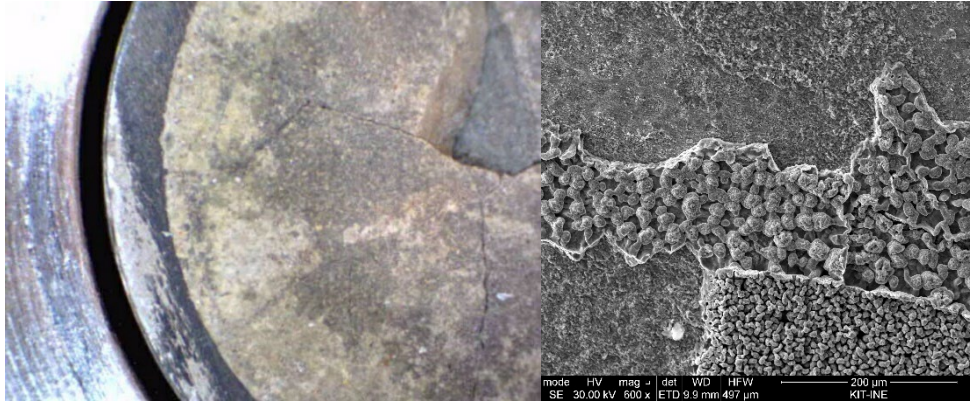


Abbildung 4: Mikroskopaufnahme der Kontaktfläche zwischen dem Hüllrohr und abgebrannten Kernbrennstoff eines DWR-Brennstabsegments mit Abbrand von 50 GWd/t (links). Ausgebildete Wechselwirkungsschicht zwischen Kernbrennstoff und Hüllrohr durch anhaftenden Kernbrennstoff auf der Oberfläche (rechts). (Quelle: E. Gonzalez Robles, M. Herm, T. König, KIT-INE)

Untersuchungen zur Verringerung von Ungewissheiten hinsichtlich des Verhaltens bestrahlter Brennelemente während der verlängerten Zwischenlagerung

Im Hinblick auf eine verlängerte Zwischenlagerung und nachfolgende Transporte sowie Behandlung an der Schnittstelle von der Zwischen- zur Endlagerung sind bestimmte sicherheitsrelevante Fragestellungen zum Langzeitverhalten der Brennstäbe von Leistungsreaktoren zu untersuchen (ESK 2015). Insbesondere zur Umorientierung von Zirkoniumhydriden in den Hüllrohren der Brennstäbe und der Auswirkungen auf Hüllrohrversagen werden international langfristige Forschungsprogramme durchgeführt (Rowold et al. 2024). Allerdings werden die meisten experimentellen Untersuchungen mit nicht-bestrahlten Hüllrohren oder nicht-bestrahlten Brennstabsimulaten durchgeführt und kaum Experimente mit realen Brennstabproben, die aus ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren stammen. In ähnlicher Weise werden die Prozesse an der Kontaktfläche zwischen dem Hüllrohr und dem abgebrannten Kernbrennstoff lediglich in einer Reihe von Experimenten mit unbestrahlten Brennstabsegmentsimulaten untersucht und nur einzelne Experimente mit bestrahlten Brennstabsegmenten aus Leistungsreaktoren durchgeführt. Mittels neuerer spektroskopischer Analysen konnten an der Hüllrohr-Kernbrennstoff-Kontaktfläche von ausgedienten Uranoxid- und Mischoxid-Brennstäben aus Leistungsreaktoren die Bildung kristalliner Cäsium-Chlorid- und Cäsium-Iodid-haltiger Aggregate nachgewiesen werden (König et al. 2024). Die strahlenchemische Zersetzung („radiolytische Dissoziation“) solcher Halogenidphasen und eine nachfolgende Reaktion von Halogenelementen, wie Chlor oder Iod, mit dem Hüllrohr kann zu dessen Korrosion führen. Solche Prozesse wären analog zu der von Sidky (1998) beschriebenen radiolytischen Dissoziation von Cäsiumiodid und einer Schädigung der Zirkoniumoxidschicht. Zusätzlich zu solchen chemischen Prozessen wird der Einfluss des Alpha-Zerfalls in der Randzone des Kernbrennstoffs und durch die Alpha-Strahlung verursacht. (Marchetti et al. 2022).

Auf Grundlage der 2023 vorliegenden Forschungsergebnisse wurde von der Entsorgungskommission (ESK 2023b) gefolgert, dass eine Öffnung von TLB zur Untersuchung des Inventars nicht erforderlich sei. Allerdings kann diese Einschätzung vor dem Hintergrund der

fortschreitenden Forschung zur Alterung des Kernbrennstoffinventars und der Ungewissheit über die Zeitdauer der Zwischenlagerung noch nicht abschließend sein (Neles et al. 2023).

In einigen Untersuchungskampagnen in Japan und den Vereinigten Staaten wurde eine kleine Anzahl von TLB geöffnet, um den Zustand der eingelagerten Brennelemente zu überprüfen (ESK 2015). Am bekanntesten ist das "Dry Cask Storage Characterization Project" der US-amerikanischen Regierung bzw. US-amerikanischen Institutionen, wie dem Department of Energy, dem Electric Power Research Institute und dem Nuclear Regulatory Commission, bei dem wichtige Studien vom Idaho National Engineering and Environmental Laboratory durchgeführt wurden. Hierbei wurde nach 15 Jahren Zwischenlagerzeit ein CASTOR® V/21 (beladen mit DWR Brennstäben mit einem mittleren Abbrand von bis zu ~45 GWd/t) geöffnet und u.a. die Brennstäbe untersucht. In Japan wurden 1995 erste Behälter mit SWR-Brennelemente mit niedrigen Abbränden von < 29 GWd/t beladen und in den Jahren 2000 und 2005 geöffnet und mittels visueller Inspektionen des Innenraums untersucht. Nach derzeitigem Kenntnisstand erscheint es in der Regel nicht erforderlich zu sein, bereits abgefertigte TLB aus deutschen Zwischenlagern für Überprüfungen zu öffnen. Der Aufwand zur Gewährleistung des Strahlenschutzes und zur Absicherung des Öffnens der Transport- und Lagerbehälter in Japan und in den Vereinigten Staaten von Amerika war enorm und mit einem gewissen Risiko verbunden. Ein Vorhaben, bei dem nicht nur ein abgefertigter TLB geöffnet, sondern auch ein Brennelement aus dem Behälter zu Untersuchungen herausgenommen werden sollte, ist technisch erst dann möglich, wenn hierfür eine geeignete kerntechnische Anlage, d.h. eine sogenannte „Heiße Zelle“, und für diese Tätigkeit ausgebildetes Personal verfügbar ist.

4. Gebäude

Bei der Betrachtung eines Gebäudes für die Lagerung von hochradioaktiven Abfällen, spielen nicht nur die technischen Anlagen und Brennstoffbehälter eine wichtige Rolle, auch die Gebäude (z.B. Zwischenlagerhalle oder auch Transportschleuse) erfüllen Aufgaben, um eine sichere Verwahrung der Reststoffe zu gewährleisten. Wie in der Einleitung erläutert, wurde beim Bau der Zwischenlager in Deutschland angenommen, dass ein Endlager innerhalb von 40 Jahren erbaut und in Betrieb genommen werden kann. Diese Annahme birgt heute ein Problem. Da das Standortauswahlverfahren laut BGE nicht bis 2031 abgeschlossen werden kann und auch alternative Entsorgungspfade weitere Zeit beanspruchen, ist eine verlängerte Zwischenlagerung an den derzeitigen Standorten nötig (siehe Abbildung 1) (BGE 2022).

Dadurch rücken der aktuelle Zustand und die Lebensdauerprognose der bestehenden Zwischenlager in den Fokus. Damit die Zwischenlagergebäude ihre Funktion der „ausreichende[n] Abschirmung der ionisierenden Strahlung zum Schutz der Bevölkerung“ (ESK 2023a) weiter erfüllen können, ist die Beurteilung des derzeitigen Zustandes, sowie eine fortlaufende Anpassung an aktuelle Geschehnisse (z.B. politische Veränderungen, kriegsrische Konflikte oder Naturereignisse mit bisher unbekanntem Ausmaß) und eine neue Beurteilung des Zustandes der Gebäude enorm wichtig. Die ersten Zwischenlagerhallen wurden in den 1980er Jahren erbaut (BASE 2021, BASE 2023). Das zentrale Zwischenlager in Gorleben wurde 1982 bis 1983 errichtet. Beim Bau von Gebäuden wurden damals, nach den allgemeinen anerkannten Regeln der Technik, bei der Bemessung eine Nutzungsdauer von ca. 50 Jahren angenommen und die Gebäude nach den damals geltenden Normen errichtet. Da diese Bauwerkslebensdauer voraussichtlich nicht nur gering, sondern erheblich überschritten wird, werden Bauwerke mit einer Lebensdauer von bis zu 120 Jahren (ESK 2023b) oder Zwischenlagerneubauten benötigt. Um eine genehmigte Weiternutzung der bestehenden Zwischenlager zu erreichen, muss der Zustand der vorhandenen Zwischenlagergebäude genauer geprüft werden. Zudem müssen rechtzeitige Instandsetzungen oder Verstärkungen der Anlagen geplant und umgesetzt werden, um die Funktion der Anlagen zur Erfüllung der Schutzziele zu gewährleisten.

Schutzziele

Die bereits in Kapitel 2 vorgestellten Schutzziele aus der ESK-Leitlinie für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern gelten für die Planung baulicher Schutzmaßnahmen, wie z.B. ein Zwischenlagergebäude, gleichermaßen. (ESK 2023a):

Für die Gebäude zur trockenen Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle lassen sich daraus Anforderungen, wie die Abschirmung der ionisierenden Strahlung oder die ordnungsgemäße Instandhaltung der baulichen Anlagen ableiten (ESK 2023a).

Vorhandene Zwischenlager und deren Gebäudekonzepte

Die Zwischenlagerkonzepte der trockenen Zwischenlagerung an den 16 Standorten bestehen aus dem AVR-Behälterlager in Jülich, den zentralen Zwischenlagern in Gorleben, Ahaus und Rubenow und den dezentralen Zwischenlagern an den restlichen Standorten (siehe Tabelle 1: Kenndaten von Zwischenlagern für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle in Deutschland). Mit Ausnahme des Zwischenlagers in Neckarwestheim wurden die 12 dezentralen Zwischenlager der Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) entweder nach dem STEAG- (ursprüngliche Abkürzung der Steinkohlen-Elektrizität AG; heute Eigenname der STEAG GmbH) oder dem WTI-Konzept (Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH) konstruiert (BASE 2023).

Insbesondere an den 6 norddeutschen Standorten (Brokdorf, Krümmel, Brunsbüttel, Grohnde, Unterweser und Lingen) befinden sich Zwischenlager nach dem Konzept der STEAG GmbH, welches Stahlbetonhallen mit einer Wandstärke von ca. 1,2 m und einer Deckenstärke von 1,3 m umfasst. Zwischenlager nach dem WTI-Konzept, konzipiert von der Wissenschaftlichen-Technischen Ingenieurberatung GmbH, weisen ca. 0,70-0,85 m dicke Wände und ca. 0,55 m dicke Decken auf. Sie basieren auf den Konstruktionen der Lagerhallen aus Stahlbeton in Ahaus und Gorleben und sind an den 5 süddeutschen Standorten (Biblis, Phillipsburg, Grafenrheinfeld, Isar und Gundremmingen) vorzufinden (BASE 2023).

So sind alle „Zwischenlager [...] als Lagerhallen aus Stahlbeton konzipiert, mit Ausnahme des Standortes Neckarwestheim“ (BASE 2020). Das Zwischenlager in Neckarwestheim ist nicht als Halle ausgebildet, sondern folgt dem Tunnel-Konzept. So wurde dieses Zwischenlager in unterirdischer Bauweise, mit zwei Tunnelröhren ausgeführt (BASE 2022).

Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken und Schadensmechanismen

Bei der Betrachtung der Gebäude als Teil eines Zwischenlagers für radioaktive Abfälle steht, wie die Gebäudekonzepte zeigen, der Werkstoff Stahlbeton im Fokus. Stahlbeton stellt einen Verbund aus den zwei Komponenten Stahl und Beton dar. Bei dem Baustoff Beton handelt es sich um ein Mehrphasengemisch aus Zement, Gesteinskörnung, Wasser sowie Zusatzstoffen und -mitteln (Abbildung 5). Beton besitzt dabei eine hohe Druckfestigkeit, welche einer geringen Zugfestigkeit gegenübersteht. Durch die Verwendung von Bewehrungsstahl und den Verbund mit der Komponente Beton wird eine Erhöhung der Zugfestigkeit erreicht.

Bei richtiger nutzungsspezifischer Bemessung sowie guter Qualität der Ausgangsstoffe und Bauausführung besitzt Stahlbeton gute Dauerhaftigkeitseigenschaften (wie passiver Korrosionsschutz der Bewehrung und Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden). Diese guten Dauerhaftigkeitseigenschaften können durch zwei Hauptschadensmechanismen beeinträchtigt werden; die Korrosion der Stahlbewehrung und die Korrosion des Betons.



Abbildung 5: Betonausgangsstoffe (oben), Bohrkern (links unten), Bewehrungsstäbe (rechts unten) (Quelle: iBMB, TU Braunschweig)

Bewehrungskorrosion

Bei der Korrosion der im Beton liegenden Bewehrung sind zwei wesentliche Schadensmechanismen zu nennen. Zum einen die karbonatisierungsinduzierte Korrosion und zum anderen die chloridinduzierte Korrosion (Stark et al. 2013). Bei diesen Schadensmechanismen bleibt der Beton zunächst unbeschädigt, bis die Bewehrung im Inneren des Betons korrodiert.

Bei der Karbonatisierung handelt es sich um einen Alterungsprozess des Betons. Zu Beginn bietet der Beton ein alkalisches Milieu in welchem der Bewehrungsstahl liegt. Durch dieses Milieu entsteht eine Passivschicht der Bewehrung (Oxidschicht 2-20 nm), welche einen Rostschutz für den Stahl darstellt. Die Karbonatisierung besteht aus einem, bei der Alterung des Betons ablaufenden, chemischen Prozess zwischen dem im Beton vorhandenem oder eindringendem Wasser, aus der Luft aufgenommenem CO₂ und den im Beton verarbeiteten Mineralien (Stark et al. 2013). Dieser Prozess bewirkt, dass der pH-Wert des Betongefüges sinkt. Durch das veränderte Milieu verliert der Bewehrungsstahl seine schützende Passivschicht (Depassivierung) und kann korrodieren (Stark et al. 2013). Dabei verläuft dieser Prozess meist flächig und gleichmäßig.

Bei der chloridinduzierten Korrosion gelangen Chloride aus der Luft an den Bewehrungsstahl. Die Chloride lösen den Stahl innerhalb des Betons lokal auf und führen so zur Lochfraßkorrosion (Stark. et al. 2013). Durch den lokal begrenzten Prozess wird diese Art der Korrosion häufig erst bei fortgeschrittenem Ausmaß an der Oberfläche sichtbar. Dadurch ist die chloridinduzierte Korrosion ein Schadensmechanismus der, wegen der späten Sichtbarkeit nach außen, nicht nur durch äußere Begutachtung, sondern am besten durch Sensorik überwacht werden sollte (siehe unten Abschnitt: Konzepte der Dauerhaftigkeitsbemessung).

Betonkorrosion

Bei der Betonkorrosion handelt es sich um Prozesse, die das Gefüge des Betons so schädigen, dass es zu sichtbaren Schäden wie Rissen und Abplatzungen kommt. Die Betonkorrosion entsteht durch verschiedene physikalische Prozesse, wie z.B. Frost-Tau-Wechsel und mechanischen Angriff, bzw. Abrieb oder durch chemische Angriffe wie z.B. dem Angriff durch Schwefelsäure, Sulfat oder auch Kieselsäure (Stark et al. 2013).

Bei dem chemischen Angriff durch Kieselsäure, welche in bestimmten Gesteinskörnungen vorkommt, handelt es sich um die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Diese Art der Betonkorrosion ist im Hinblick auf Lagergebäude für abgebrannte Brennelemente und radioaktive Abfälle ein möglicher Schadensmechanismus. Die AKR, welche umgangssprachlich auch als Betonkrebs bezeichnet wird, entsteht, wenn ein Beton, welcher mit Hilfe von Kies mit einem hohen Anteil an löslicher Kieselsäure hergestellt wurde, zu viel Feuchtigkeit ausgesetzt wird. Diese amorphe, lösliche Kieselsäure befindet sich z.B. in Gesteinskörnungen wie Opalsandstein, Grauwacke oder Feuerstein (Stark et al. 2013). Durch das Vorhandensein von Wasser, Alkalien aus dem Zement und der Kieselsäure aus der Gesteinskörnung entsteht eine chemische Reaktion, welche die Bildung von Alkalisilicat zur Folge hat. Bei dieser Treibreaktion entstehen die für AKR typischen, gelartigen und quellfähigen Ausscheidungen und ein typisches netzartiges Rissbild (Habibi et al. 2015, DAfStb 2007).

Auch bei nuklearen Anlagen ist die AKR ein bekanntes Problem. So wurde z.B. die Verlängerung der Betriebslizenz des Kernkraftwerkes Seabrook (Seabrook Station), nach der Feststellung von AKR an vier Gebäuden, aufgeschoben (Habibi et al. 2015, Snyder et al. 2013).

Geltende Normen

Bei der Beurteilung des Zustandes der bestehenden Zwischenlageranlagen sind nicht nur die typischen Schadensmechanismen bei Stahlbetonbauwerken zu bedenken, zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass beim Bau der Gebäude die zum jeweiligen Zeitpunkt geltende Norm herangezogen wurde. Dadurch wurden z.B. in den 1980er- und 1990er-Jahren, bei der Auswahl eines geeigneten Betons für ein Gebäude, keine Norm mit den heutigen Expositionsklassen berücksichtigt, sondern die damals gültige Norm DIN 1045 Version (1978-12-00 – 1988-07-00) (DIN 1045, 1978) bzw. DIN 1045 Version (1988-07-00 – 2001-07-00) (DIN 1045, 1988). Die heutigen Expositionsklassen finden seit DIN EN 1992-1-1/NA, ausgegeben im September 2008, Anwendung und berücksichtigen chemische und physikalische Einwirkungen auf den Beton und den Betonstahl, welche sich aus der Umgebung und Nutzung eines Gebäudes ergeben. Durch die Einordnung in eine Expositionsklasse, je nach Art der schädigenden Einwirkung, wird die Widerstandsfähigkeit gegenüber den zu erwartenden Einwirkungen gewährleistet und eine ausreichende Dauerhaftigkeit sichergestellt (DIN 1992).

Wurden die ortsspezifischen schädigenden Einwirkungen bei der Auswahl des Betons und dessen Bemessung nicht berücksichtigt, kann dies die Dauerhaftigkeit der Gebäude beeinträchtigen. Dadurch könnte die ehemals kalkulierte Lebensdauer inkorrekt sein und Schädigungen früher eintreten als angenommen. Zum Beispiel wurde die Schädigung des Betons durch eine AKR, bei der Auswahl einer geeigneten Zusammensetzung des Betons, erst in der Fassung der DIN 1045-1 vom August 2008, durch die hinzugefügte Expositionsklasse W „Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion“ (DIN 1045 1988), berücksichtigt. Gebäude mit Baustoffzusammensetzungen nach veralteten Normen könnten für die verlängerte Nutzungsdauer nicht die nötige Widerstandsfähigkeit aufbringen. Dies muss bei der Beurteilung von Zwischenlagergebäuden berücksichtigt werden, sodass diese den besonderen Einwirkungen auf kerntechnische Anlagen, wie SEWD und FLAB (siehe unten Abschnitt: Besondere Einwirkungen auf kerntechnische Anlagen) standhalten können. Um

den aktuellen Zustand eines Gebäudes zu beurteilen, die spezifischen Schadensmechanismen und deren Fortschritt zu erkennen und die Prognose der Lebensdauer anzupassen, benötigt es eingehende Untersuchungen am Bauwerk (siehe unten Abschnitt: Adaptive Lebensdauerprognose).

Besondere Einwirkungen auf kerntechnische Anlagen

Bei der Betrachtung der Besonderheiten einer kerntechnischen Anlage müssen verschiedene Einwirkungen betrachtet werden. Dazu zählen nicht nur gängige, bei baulichen Anlagen zu berücksichtigende, Einwirkungen, wie Lasten, Wind oder Schnee (DIN EN 1991-1), sondern auch besondere Einwirkungen wie extreme Temperaturen u.w. Das kerntechnische Regelwerk (ESK 2023a) schreibt dabei die Berücksichtigung der besonderen Einwirkungen, extreme Temperaturen, Erdbeben, Hochwasser, FLAB (Flugzeugabsturz), Druckwelle, Brand und Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) vor (ESK 2023a). „Als SEWD werden insbesondere auch terroristisch motivierte Taten und kriminelle Handlungen in Betracht gezogen“ (BASE 2020). Vor allem im Bereich des SEWD sind manche der bestehenden Zwischenlager laut dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung nicht auf dem aktuellen Stand. Denn „2010 hat sich die Bewertung und Erkenntnislage zu bestimmten Angriffsszenarien im Nahbereich der Transport- und Lagerbehälter derart verändert, dass die Sicherungsmaßnahmen optimiert werden müssen“ (BASE 2020). Dies betrifft auch bauliche Maßnahmen, wie die Verstärkung der Wände. Diese konnten noch nicht bei allen Zwischenlagern umgesetzt werden, sollten jedoch bei einer Zustandsbeurteilung und Sanierungsplanung berücksichtigt werden. „Bei Zwischenlagern, für die die sicherungstechnische Nachrüstung bislang noch nicht vollständig umgesetzt ist, wird derzeit der erforderliche Schutz gegen SEWD ergänzend zu den bereits bestehenden Sicherungsmaßnahmen durch sog. ausreichende temporäre Maßnahmen von den Betreibern der Zwischenlager realisiert“ (BASE 2020).

Derzeitige Untersuchungen

Die Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern schreibt alle 10 Jahre eine Periodische Sicherheitsüberprüfung vor (ESK 2023a). Die Details dieser Überprüfung sind in den Leitlinien zur Sicherheitsüberprüfung von Zwischenlagern für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle zu finden. Diese Überprüfung beinhaltet eine ganzheitliche Betrachtung der Gebäude, Behälter, technischen Anlagen, des Personals usw. und beurteilen den aktuellen Zustand, sowie die seit der letzten Überprüfung entstandenen Änderungen und eingetretenen Störfälle (ESK 2024). Diese Prüfungen bestehen jedoch, im Hinblick auf die Gebäude, häufig aus oberflächennahen, sowie punktuellen Untersuchungen. Durch die Bedeutung des Zustandes der Zwischenlagergebäude für die Erfüllung der Schutzziele, wäre eine dauerhafte und flächendeckende Überwachung (Monitoring) des Schädigungsfortschritts sinnvoll, wie es auch von der IAEA für Kernkraftwerke empfohlen wird (IAEA 2016).

Konzepte der Dauerhaftigkeitsbemessung

Im Bauwesen gibt es unterschiedliche gängige Konzepte zur Bemessung der Dauerhaftigkeit eines Bauwerkes. Ein gängiges Konzept ist das deskriptive Konzept, hier handelt es sich um die Dauerhaftigkeitsbemessung durch die Einhaltung von Regeln auf Basis von Erfahrungswerten. Bei der Planung des Bauwerkes werden, aufgrund von zu erwartenden Beanspruchungen notwendige Gebrauchseigenschaften (z.B. Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Angriff) festgelegt und die zu erfüllenden Anforderungen der Baustoffe über Regelwerke (z.B. Einordnung in Expositionsklassen) bestimmt. Ein festzulegendes Kriterium ist dabei die mittlere Lebensdauer (DIN 1045). Der Zustand des Bauwerkes wird nach der Bemessung und Errichtung im Alterungsverlauf (z.B. bei regelmäßigen Inspektionen, durch die Erfassung der bisher entstandenen Schäden bis zum aktuellen Zeitpunkt) über die Einhaltung von Grenzwerten beurteilt. Das Konzept ist somit vergangenheitsorientiert.

Ein anderes Konzept ist das Performance-Konzept. Dies beschreibt die Dauerhaftigkeitsbemessung über den Nachweis des Verhaltens von Bauwerken unter realen Einwirkungen durch Verwendung von Bemessungsmodellen. Diese rechnerischen Modelle werden von Labormesswerten oder Bauwerksdaten, wie Materialwiderstände (z.B. Karbonatisierungswiderstand), gestützt. Eine geforderte Lebensdauer wird bei dem Performance-Konzept gewählt und als Parameter in die Berechnungen eingegeben. Die rechnerische Lebensdauer wird dann über die Bemessungsmodelle ermittelt. Eine Beurteilung des Zustandes des Bauwerkes erfolgt auch hier während des Alterungsprozesses über regelmäßige Inspektionen und Einhaltung von Grenzwerten (Grube et al. 2001).

Da die Bemessung der Dauerhaftigkeit über das Performance-Konzept mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist und nicht für alle Einwirkungen möglich ist, wird üblicherweise das deskriptive Konzept angewandt (Grube et al. 2001).

Ein vorausschauendes, zukunftsorientiertes Konzept zur Ermittlung der Lebensdauer eines Bauwerkes ist die adaptive Lebensdauerprognose, welche eine Prognose mit Echtzeitinformationen aus Monitoringdaten ermöglicht (siehe Kapitel: Adaptive Lebensdauerprognose) (Bruder 2007).

Bauwerksmonitoring

Die laufende Erfassung des Bauwerkszustandes findet mittels geeigneter Sensorik statt. Dabei sind die Sensoren unterteilt nach verschiedenen Messgrößen z.B. Verformungen, Neigungsänderungen, Feuchtigkeit, Temperaturveränderungen und Korrosion. Zur Erkennung von Korrosion eignen sich z.B. Drahtsensoren. Drahtsensoren bestehen aus einem Mörtelhalbzylinder mit Ringnuten und dünnen Eisendrähten sowie einer Platine mit unterschiedlichen elektrischen Widerständen (Abbildung 6).

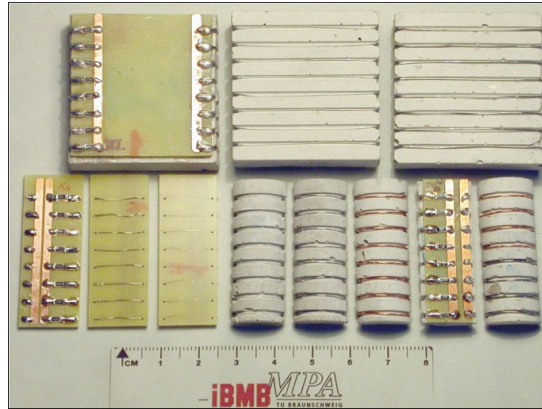


Abbildung 6: Vorder- und Rückseite einiger Drahtsensoren (Quelle: Holst et al. 2008)

Die dünnen Eisendröhte sind mit unterschiedlichen Widerständen auf der Platine so verbunden, dass ein durch Korrosion verursachter Drahtbruch zu einer Erhöhung des Widerstandes führt. Der Betrag der Änderung des Widerstandes zeigt dabei an, welche Dröhte aktuell schon durchkorrodiert sind.

Im eingebauten Zustand korrodieren die Eisendröhte nacheinander bei fortschreitender Korrosionsfront im Beton oder durch eindringende korrosive Flüssigkeiten (z.B. in Wasser gelöste Chloride). Bei der Messung des Widerstandes des Drahtsensors erhöht sich dieser sprunghaft, sobald ein Draht korrodiert ist. So kann eine fortschreitende Korrosion innerhalb eines Bauwerkes über diese Widerstands-Sprünge im Monitoring erkannt werden, siehe auch den folgenden Abschnitt Adaptive Lebensdauerprognose (Abbildung 7) (Holst et al. 2008).

Adaptive Lebensdauerprognose

Als ganzheitliche, flächendeckende, kontinuierliche, zukunftsorientierte Überwachung eines Bauwerks bietet sich die adaptive Lebensdauerprognose an. Dabei fließen Daten aus einem Bauwerksmonitoring und ergänzende Daten durch Bauwerksuntersuchungen (wie z.B. Bohrmehlentnahmen) zusammen. Diese Ergebnisse werden genutzt, um Parameter von Schädigungsmodellen anzupassen und so die Lebensdauerprognose kontinuierlich zu aktualisieren (Abbildung 7) (Bruder 2007).

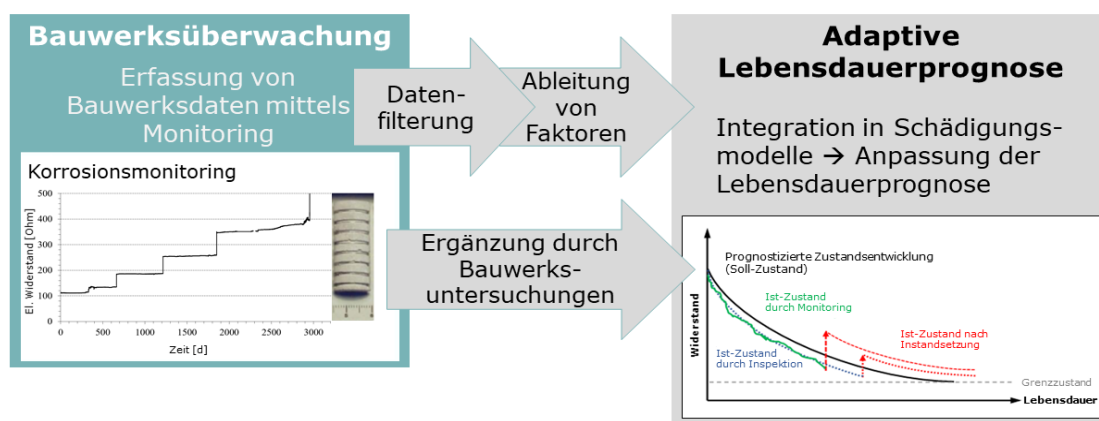


Abbildung 7: Konzept, adaptive Lebensdauerprognose (Quelle: TU Braunschweig, IBMB, Fachgebiet Baustoffe)

Die adaptive Lebensdauerprognose bietet im Gegensatz zu dem zuvor genannten deskriptiven Konzept einerseits und dem Performance-Konzept andererseits einige Vorteile. Die adaptive Lebensdauerprognose erlaubt eine realitätsnahe Vorhersage, sowie die Verifikation und Überwachung der Restnutzungsdauer eines Bauwerkes. Sie ermöglicht einen ständigen Vergleich mit aktualisierten und prognostizierten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen. Dadurch können frühzeitig notwendige Instandsetzungsmaßnahmen aufgrund von Schädigungen, aber auch durch veränderte Einwirkungsszenarien erkannt werden (Bruder 2007).

Aufgrund der Gesetzeslage, der Verzögerung bei der Auswahl eines Endlagerstandortes und der dadurch notwendigen verlängerten Nutzungsdauer einiger bestehender Zwischenlager ist eine genaue Beurteilung der Gebäude, sowie eine rechtzeitige, gezielte Instandsetzung und Verstärkung von Bedeutung, um mögliche Risiken durch Schäden am Bauwerk zu vermeiden (ESK 2023b). Dabei ist deutlich geworden, dass eine einmalige Prognose der Lebensdauer die vielfältigen zukünftigen Einwirkungen, welche die Lebensdauer beeinflussen, nicht präzise abbilden kann.

Um die Erfüllung der Schutzziele der Zwischenlagergebäude und somit die Sicherheit zu gewährleisten, ist es sinnvoll die Beurteilung des Zustandes und der Lebensdauer der Zwischenlager mit Hilfe einer adaptiven Lebensdauerprognose stetig anzupassen.

5. Öffentlichkeitsbeteiligung

Die Zwischenlagerung ist bis zur Abgabe des letzten Behälters an die der Endlagerung vorgeschaltete Konditionierung erforderlich. Die entsprechenden Zwischenlager wurden gemäß § 6 Absatz 5 des Atomgesetzes befristet genehmigt (siehe Tabelle 1) und werden mit dieser Genehmigung den erforderlichen Zeitraum nicht abdecken. Eine Verlängerung der Zwischenlagerung „darf nur aus unabweisbaren Gründen und nach der vorherigen Befassung des Deutschen Bundestages erfolgen“ (AtG 1959).

Die Zwischenlagerung wird von der Entstehung des ersten Zwischenlagers (Brennelemente-Zwischenlager Gorleben (BZG)) an von kritischen Diskussionen aus der Öffentlichkeit begleitet. Spätestens mit Bekanntwerden der Terminalszenarien der BGE zum Standortauswahlverfahren Ende 2022 ist die Diskussion auch über Wechselwirkungen mit der Zwischenlagerung entbrannt (Röhlig 2023; Wendler 2023; Thomauske 2023). Eine Verlängerung der Zwischenlagerung über die 40 Jahre hinaus ist nicht vermeidbar. Wie lange dieser Zeitraum dauern wird, lässt sich noch nicht abschätzen.



Abbildung 8: Zeichen des Widerstands bei Ahaus (Quelle: Öko-Institut 2017)

Nach aktueller Auffassung kommt eine Verlängerung der Zwischenlagerung einer Neugenehmigung gleich (ESK 2023b). Ein wesentlicher Bestandteil des Genehmigungsverfahrens ist die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gemäß UVP-Gesetz (UVPG 1990), die die formale Beteiligung der Öffentlichkeit beinhaltet. Rechtliche Grundlage für das Genehmigungsverfahren sind insbesondere das Atomgesetz (AtG 1959) und die Atomrechtlichen Verfahrensverordnung (AtVfV 1977) sowie untergesetzliches Regelwerk wie z. B. Leitlinien der Entsorgungskommission. In einem zukünftigen Genehmigungsverfahren ist nachzuweisen, dass die Schutzziele (ESK 2023a) auch mit dann 40 Jahre alten Behältern und Komponenten über die angestrebte Genehmigungsdauer sicher eingehalten werden.

Noch offen ist, ob die Neugenehmigung der Zwischenlager erneut befristet sein soll und dies vorausgesetzt, welcher Zeitraum zugrunde gelegt werden soll. Dafür wird neben der

unbekannten erforderlichen Zwischenlagerdauer beispielsweise relevant sein, welchen Zeitraum die sicherheitstechnischen Nachweise abdecken können oder sollen. Nach derzeitiger Einschätzung ist es Aufgabe der BGZ diesen Zeitraum zu definieren⁷. Das BASE als zuständige Genehmigungsbehörde ist für die Prüfung verantwortlich.

Neben den technischen Aspekten ist auch das Genehmigungsverfahren selbst und hier die Verknüpfung mit der formellen Öffentlichkeitsbeteiligung zu berücksichtigen. Derzeit eröffnet nur ein Genehmigungsverfahren mit UVP die Möglichkeit, Öffentlichkeit (formell) zu beteiligen und damit auch die Relevanz der Zwischenlagerung zu würdigen. Ein zusätzlicher Benefit ist, dass eine formelle Öffentlichkeitsbeteiligung in aller Regel von ergänzenden informellen Formaten begleitet wird, die ein hohes Maß an Information und Dialog für die Öffentlichkeit bereitstellen (Kallenbach-Herbert 2016).

Grundsätzlich ergeben sich für das Genehmigungsmanagement zwei Wege:

Möglichkeit A ist die Genehmigung eines langen Zeitraums, der möglichst vollständig den Zwischenlagerzeitraum abdeckt. Die sicherheitstechnischen Nachweise zur Einhaltung der Schutzziele sind entsprechend über diesen Zeitraum zu führen. Ein weiteres Zwischenlager-Genemigungsverfahren einschließlich der entsprechenden Öffentlichkeitsbeteiligung findet nicht statt. Mittels gesetzlich festgeschriebener periodischer Sicherheitsüberprüfungen werden alle zehn Jahre umfassende Sicherheitsüberprüfungen durchgeführt, die allerdings weder eine Veröffentlichung der Ergebnisse noch eine Öffentlichkeitsbeteiligung vorsieht.

Die Möglichkeit B sieht dagegen als Genehmigungsdauer einen kürzeren nicht abdecken den Zeitraum vor, z. B. 10 Jahre wie in der Tschechischen Republik üblich (State Office for Nuclear Safety 2020). Das Genehmigungsmanagement ist darauf ausgelegt, dass alle z. B. 10 Jahre eine weitere Genehmigung mit einem vollumfänglichen Genehmigungsverfahren einschließlich Öffentlichkeitsbeteiligung stattfindet. Die Nachweise zur Einhaltung der Schutzziele müssten dann erneut für den jeweiligen Folgezeitraum erbracht werden. Eine sicherheitstechnische Bewertung der Zwischenlagerung über die genehmigte Dauer hinaus ist allerdings im Genehmigungsverfahren nicht etabliert.

Denkbar sind auch Mischformen der genannten Möglichkeiten, die die Vor- und Nachteile kompensieren. Insbesondere müsste der Öffentlichkeit mehr als einmal die Möglichkeit gegeben werden, am Genehmigungsverfahren beteiligt zu werden und die sicherheitstechnische Bewertung sollte bei der Neugenehmigung den gesamten erforderlichen Zwischenlagerzeitraum in den Blick nehmen.

Das Erfordernis von Öffentlichkeitsbeteiligung lässt sich bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle nicht auf einzelne Genehmigungsverfahren oder einzelne Anlagen begrenzen. Die Verfahren und die darin gemachten Erfahrungen stehen in Wechselwirkung zueinander, wie auch die Entsorgungsschritte aufeinander aufbauen. Die direkte Abhängigkeit der Zwischenlagerung von dem Standortauswahlverfahren findet Eingang in das Standortauswahlgesetz (StandAG 2017). Als formelles Beteiligungsformat sieht das StandAG die Fachkonferenz Rat der Regionen vor, in dem die Zwischenlagerstandortgemeinden gemeinsam mit den Endlagerstandortregionen vertreten sein werden. Die Fachkonferenz Rat der Regionen

⁷ Siehe dazu <https://forum-zwischenlagerung.bgz.de/5119-2/>; Fragen und Antworten aus dem Dialogformat Forum Zwischenlagerung zum Thema verlängerte Zwischenlagerung finden sich hier <https://forum-zwischenlagerung.bgz.de/alle-fragen-verlaengerte-zwischenlagerung/> zuletzt abgerufen 17.12.2024

wird allerdings erst in Phase 2 des Standortauswahlverfahrens mit der Einsetzung der Regionalkonferenzen ab Ende 2027 gegründet. Einzelheiten wie Sitzverteilung oder Arbeitsweise stehen noch nicht fest. Als Aufgabe wird gemäß § 11 Absatz 2 StandAG formuliert: „Die Fachkonferenz Rat der Regionen begleitet die Prozesse der Regionalkonferenzen aus überregionaler Sicht und leistet Hilfestellung beim Ausgleich widerstreitender Interessen der Standortregionen“. Daraus wird nicht deutlich, wie die Interessen der Zwischenlagerstandortgemeinden berücksichtigt werden.

Beteiligungsformate oder einen Träger von Öffentlichkeitsbeteiligung, die direkt in den Zwischenlagerregionen wirksam werden, sieht das Atomrecht nicht vor. Informelle Formate der Unternehmenskommunikation werden derzeit von den beiden Betreibern BGZ und EWN-Gruppe angeboten⁸. Die BGZ führt beispielsweise im Rahmen ihrer Öffentlichkeitsarbeit Dialogveranstaltungen in verschiedenen Kommunen, Anlagenbesichtigungen z. B. für Politiker:innen oder Studierende und Informationsangebote zu spezifischen Themen durch. Weitere Formate sind angekündigt (BGZ 17.11.2023).

Das „Forum Zwischenlagerung“ ist ein überregionales Veranstaltungsformat, das 2018 vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE), dem Vorläufer des BASE, ins Leben gerufen wurde. Die BGZ führt die Veranstaltungsreihe seit 2021 mit eigenem Fokus fort⁹. Auf ihrer Website verweist die BGZ auf diese Aktivitäten und ordnet sie als frühe Öffentlichkeitsbeteiligung ein¹⁰ allerdings ohne Bezug auf ein bestimmtes Genehmigungsverfahren.

Die EWN führt derzeit ein Genehmigungsverfahren für das neue Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle, als Ersatztransportbehälterlager ESTRAL bezeichnet, durch. Von 2017 bis 2019, im Vorfeld des Genehmigungsverfahrens nach § 6 AtG wurde durch den Antragsteller eine frühe Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 25 Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG 1976) durchgeführt. Diese umfasste Veranstaltungen und Informationsmaterial und ist über die Website ausführlich dokumentiert¹¹.

Betreiberunabhängige Informationsangebote gibt es derzeit nicht. Solche sollten beispielsweise von Aufsichts- oder Genehmigungsbehörden oder den zuständigen Ministerien auf Bundes- und Landesebene angeboten werden. Da sie keine Unternehmensinteressen berücksichtigen müssen, können sie eigene Themen setzen und als Korrektiv vertrauensbildend wirken. Solche Themen könnten u. a. sein:

- Langfristige Kontinuität der zuständigen Organisationen in einem auf „Checks and Balances“ ausgerichteten System
- Transparente Verfahren bei Genehmigung aber auch bei periodischen Sicherheitsüberprüfungen
- Kommunikation über sicherheitsrelevante Aspekte, wie offen kann sie im Hinblick auf Sicherheitsfragen sein?
- Sicherheitserfordernisse von Fragen der Wirtschaftlichkeit entkoppeln

⁸ Siehe z. B. <https://bgz.de/veranstaltungen/> zuletzt abgerufen 17.12.2024

⁹ Die Veranstaltungen sind dokumentiert unter <https://forum-zwischenlagerung.bgz.de/> zuletzt abgerufen 17.12.2024

¹⁰ Siehe dazu <https://forum-zwischenlagerung.bgz.de/877-2/> zuletzt abgerufen 17.12.2024

¹¹ Aktueller Stand und Ablauf des Genehmigungsverfahrens sowie Dokumente finden sich hier <https://www.ewn-gmbh.de/projekte/estral> zuletzt abgerufen 17.12.2024

Darüber hinaus muss das Thema "Gesamtsystem Entsorgung, Abhängigkeit von Zwischen- und Endlagerung" einen Diskussionsrahmen erhalten. Die Verzahnungen sind vielfältig und betreffen neben den technischen und zeitlichen Aspekten auch Fragen der Organisation, des Wissensmanagements und der Finanzierung.

Vor dem Hintergrund der deutlich verlängerten Zwischenlagerdauer wurde der Arbeitskreis "Evaluation und Zeitplan Standortauswahlverfahren" zum Austausch des BMUV mit dem BASE gegründet¹². Ziel ist insbesondere die Befassung mit Möglichkeiten, die Verzögerungen im Standortauswahlverfahren vermeiden und Beschleunigung bewirken. Aber ausgetauscht wird sich auch zu anderen Themen, wie beispielsweise ergänzende Beteiligungsformate (BMUV 2024a). Öffentliche Diskussionen erfolgen dazu auch bei den Veranstaltungen des Forum Endlagersuche. Verwiesen wird auf die Zwischenlagerung als Teil des Entsorgungssystems: „die Million Jahre hat bereits begonnen“ (Röhlig et al. 2023), auch die äußere Gefährdungslage oder das Erlahmen des Interesses sind Auswirkungen (Röhlig et al. 2023). Konkrete Beteiligungskonzepte, die der nun deutlich verlängerten Zwischenlagerung in der Region Rechnung tragen, liegen aber noch nicht vor. Entsprechend formulieren Betroffene ihre eigenen Antworten. Bereits seit 2018 fordert die Arbeitsgemeinschaft der Standortgemeinden mit kerntechnischen Anlagen in Deutschland (ASKETA 2024) einen Sitz im Nationalen Begleitzentrum (NBG 2024)¹³.

Bei ihrer Jahrestagung im Juni 2024 wurde von der ASKETA diese Forderung bekräftigt, neue wie die Forderung von Kompensationszahlungen kommen hinzu. Die „Grafenrheinfelder Erklärung“ (ASKETA 2024) umfasst folgende Forderungen an Politik und zuständige Akteure:

1. Sofortiger Einstieg in die Neugenehmigungsverfahren der Zwischenlager mit UVP und Öffentlichkeitsbeteiligung und Durchführung von UVPs mit Öffentlichkeitsbeteiligung bei den Änderungsgenehmigungsverfahren zur erweiterten Zwischenlagerung von Behältern aus der Wiederaufarbeitung
2. Entscheidung zur Schaffung eines zentralen Eingangslagers bei Endlagerstandortfestlegung durch den Bundestag
3. Zwei Sitze im NBG und Erweiterung der Themenzuständigkeit des NBGs um die Zwischenlagerung
4. Kompensationen für Zwischenlagerkommunen analog zu Ausgleichszahlungen in Ahaus und Gorleben
5. Verbindlicher Terminrahmenplan für das Standortauswahlverfahren
6. Jährliche Fortschrittsberichte zu Zwischen- und Endlagerung durch die zuständigen Akteure (ASKETA 2024)

Die im Positionspapier genannten Kompensationszahlungen sollen im Bereich von 800.000 € bis 1,3 Millionen € pro Jahr pro Standort betragen (TV Mainfranken 2024). Begründet werden sie mit der gesamtgesellschaftlichen Last, die für Generationen übernommen wird. Die Zwischenlager werden als „de facto-Endlager“ (ASKETA 2024) bezeichnet.

¹² Die Protokolle des Arbeitskreises werden auf der Infoplattform Endlagersuche veröffentlicht, siehe hier <https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Endlagersuche/Der-Suchprozess/zeithorizonte/ak-evaluation-und-zeitplan.html> zuletzt abgerufen 17.12.2024

¹³ Siehe hier die Forderungen der ASKETA von 2018 <https://www.asketa.de/> zuletzt abgerufen 17.12.2024

Für diese Aufgabe fordert die ASKETA Unterstützung, die Lasten der Lagerung müssten gleichwertig behandelt werden, auch um Vertrauen zu bilden.

Der Frage nach Belastungen aber auch Chancen einer Region durch die verlängerte Zwischenlagerung ist das Vorhaben „Zwischenlager und Region“ (Neles 2023) nachgegangen. Konkrete Belastungen ergeben sich an den Standorten dezentraler Zwischenlager in erster Linie durch den Rückbau der Kernkraftwerke. Der damit verbundene Strukturwandel wird derzeit wenig z. B. durch politische Rahmenbedingungen unterstützt. Die Auswirkungen sind abhängig von der jeweiligen wirtschaftlichen Situation der Landkreise bzw. Regionen und bedürfen einer differenzierten Betrachtung. Die konkreten Standortgemeinden sind dagegen durch Investitionen der Gewerbesteuereinnahmen finanziell abgesichert (Neles 2023). Vor diesem Hintergrund sind die geforderten Kompensationszahlungen zumindest zu hinterfragen. Sollten solche Zahlungen erfolgen, dann sollten sie der strukturellen Entwicklung der ganzen Region zugutekommen.

Mit einer Mitgliedschaft im NBG mangels anderer Formate würden die Zwischenlagerkommunen bereits jetzt sicherstellen, dass ihre Interessen im Standortauswahlverfahren vertreten sind. Das NBG hat nach StandAG die Aufgabe, „die vermittelnde und unabhängige Begleitung des Standortauswahlverfahrens, insbesondere der Öffentlichkeitsbeteiligung“ (§ 8 Absatz 1 StandAG) durchzuführen und soll so Vertrauen schaffen. Auch wenn das Gesetz keine Aussage zu Vertreter:innen der Zwischenlagerstandorte im NBG macht, soll das Gremium keine Interessenvertretung sein. Ausdrücklich werden politische Vertreter:innen von Bund und Land ausgeschlossen (StandAG 2017). Die Geschäftsordnung des NBG schließt zudem Personen mit wirtschaftlichen Interessen als Mitglieder aus (NBG 2024).

Möglicherweise könnte eine zu definierende Form der Beteiligung im NBG, beispielsweise als ständige Gäste mit Rederecht aber ohne Stimmrecht, eine Zwischenlösung bis zur Etablierung weiterer Beteiligungsformate darstellen. Über die Dauer des Standortauswahlverfahrens hinweg müssen die Interessen der Zwischenlagerstandorte und der potenziellen Endlagerstandorte ausbalanciert in Beteiligungsformaten vertreten sein. Dies sollte immer wieder, zumindest zu Beginn jeder Phase evaluiert und angepasst werden.

Der Umgang mit dem Beteiligungsbedarf der Zwischenlagerstandorte im Standortauswahlverfahren könnte sich wiederum auf die Neugenehmigungsverfahren der Zwischenlager auswirken, da Vertrauen nicht nach Verfahren getrennt, sondern sich wechselseitig auf- oder abbaut. Die Befragungen, die im Rahmen des Vorhabens „Zwischenlager und Region“ (Neles et al. 2023) durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass in den Zwischenlagerregionen zudem ein Beteiligungsgedächtnis wahrzunehmen ist. Hingewiesen wurde z. B. auf eingeschränkte Zugänglichkeit zu Genehmigungsunterlagen bei vergangenen Genehmigungsverfahren. Die o. g. Kritik der ASKETA, wichtige Änderungsgenehmigungen ohne Öffentlichkeitsbeteiligung durchzuführen, wurde schon früher vielfach geäußert (z. B. Atommüllkonferenz 2018).

Für eine gelingende Öffentlichkeitsbeteiligung ist es sinnvoll, dass die verfahrensleitende Behörde diese Kritik aufgreift und Herausforderungen und Hemmnisse frühzeitig adressiert (Neles et al. 2023). Geeignete Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung anzubieten, sind auch Teil einer Würdigung der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe. Wichtig wird zudem sein, den Wert des Genehmigungsverfahrens und seine Ergebnisoffenheit deutlich zu machen.

Wenn Zwischenlager ohne Genehmigung auf behördliche Anordnung weiter betrieben werden können, wird das Vertrauen in rechtsstaatliche Regeln stark belastet. Das wirkt sich aber eben auch auf das Vertrauen in das Standortauswahlverfahren aus.

6. Fazit

Für neue Genehmigungen von Zwischenlagern hochradioaktiver Abfälle, die nach den ersten vierzig Jahren Betriebszeit gefordert werden, sind verschiedene technische und nicht-technische Aspekte zu berücksichtigen. Sowohl für technische Herausforderungen der Zwischenlagerung als auch für die Belange der Standortgemeinden, der Öffentlichkeit und der mit der Zwischenlagerung beschäftigten Institutionen ist entscheidend, dass die Zwischenlagerung als „Jahrhundertaufgabe“ wahrgenommen wird. Eine Zwischenlagerung über eine Zeitspanne von mehr als vierzig Jahren ist als notwendige verlängerte Zwischenlagerung zu behandeln. Letztlich muss die Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle so lange sicher gewährleistet werden, bis ein Endlagerbergwerk zur Verfügung und anschließend alle zwischengelagerten Abfälle konditioniert und dort eingelagert sein werden. In neueren Prognosen wird davon ausgegangen, dass die Einlagerung der letzten zwischengelagerten hochradioaktiven Abfälle erst zum Anfang des nächsten Jahrhunderts erfolgen kann. Nicht allein die zeitliche Dimension verdeutlicht, dass Zwischen- und Endlagerung zwei miteinander verzahnte Teile auf dem Entsorgungspfad der hochradioaktiven Abfälle darstellen. Die Verzahnungen zwischen den beiden Teilen des Entsorgungspfads sind vielfältig und betreffen technische Interdependenzen und gegenseitige Abhängigkeiten bei der Organisation, des Wissensmanagements und der Finanzierung der Entsorgungsschritte.

Zeit ist ein sicherheitsrelevanter Einflussfaktor. Im Unterschied zum Mehrbarrierenkonzept eines geologischen Endlagers in einem geeigneten Wirtsgestein, in dem mit der Zeit die natürlichen Isolationseigenschaften des Gesteins und der geotechnischen Barriere den Einschluss der Radionuklide übernehmen und somit stabilisieren, werden bei der Zwischenlagerung die Sicherheitsfunktionen der Gebäude, der Behälter und der Abfallmatrizes mit fortschreitender Zeit alterungsbedingt geschwächt. Neben diesen technischen Sicherheitsaspekten führen die Ungewissheit über gesellschaftliche, wirtschaftliche, geopolitische Entwicklungen bis zum Ende dieses Jahrhunderts und andere Sicherheitsaspekte zu der Schlussfolgerung, dass die notwendige verlängerte Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle in Oberflächenanlagen möglichst zügig durch eine tiefegeologische Endlagerung in einem geeigneten Wirtsgestein abgelöst werden soll.

Vor dem Hintergrund der langen Zeitdauer der nötigen verlängerten Zwischenlagerung und der Verzahnung der Zwischen- mit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist auch der Öffentlichkeitsbeteiligung besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Während im Standortauswahlverfahren neben einer Beteiligung auf nationaler Ebene (z. B. NBG, Forum Endlagersuche) auch eine Beteiligung auf regionaler Ebene (Regionalkonferenzen) etabliert wird, beschränkt sich die Öffentlichkeitsbeteiligung an den Zwischenlagerstandorten auf das formelle UVP-Verfahren im Rahmen der Genehmigungsverfahren der Zwischenlager. Je nach Ausgestaltung der zukünftigen Genehmigungen kann daraus resultieren, dass mehrere Generationen von Zwischenlageranwohner:innen keine Beteiligungsmöglichkeiten hinsichtlich des Zwischenlagers haben werden. Vor dem Hintergrund der langen Zwischenlagerzeiträume führt dies zu einer deutlichen Dysbalance zu den Standortregionen und kann als ungerecht wahrgenommen werden. Öffentlichkeitsbeteiligung ist zwar aufwendig, bietet aber immer die Möglichkeit eines Korrektivs und letztlich einer Verbesserung von Entsorgung. Wir schlagen vor, dass an den Zwischenlagerstandorten betreiberunabhängige In-

formations- und Dialogangebote – beispielsweise von Aufsichts- oder Genehmigungsbehörden oder den zuständigen Ministerien auf Bundes- und Landesebene angeboten – etabliert werden sollen. Zudem müsste auch den kommunalen Vertreter:innen die Möglichkeit der Beteiligung gegeben werden. Solche Angebote sollten beispielsweise die ergebnisoffene Prüfung der Genehmigungsanträge der Zwischenlager vermitteln und können so vertrauensbildend wirken, nicht nur im Hinblick auf die Zwischenlagerung, sondern auch im Hinblick auf das Standortauswahlverfahren.

Der großen Zeitspanne der notwendigen verlängerten Zwischenlagerung ist maßgeblich Rechnung zu tragen, indem bei den neuen Genehmigungen von Zwischenlagern hochradioaktiver Abfälle relevante Sicherheits- und Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen sind, die für die bisherige Zwischenlagerung von vierzig Jahren noch nicht in dem Umfang relevant waren.

Die Gebäude der existierenden Oberflächenlager wurden für eine erwartete „Lebensdauer“ von fünfzig Jahren oder eine kürzere Zeitspanne konzipiert und errichtet. Für die Zwischenlagerung sind nunmehr Bauwerke mit einer Lebensdauer von bis zu 120 Jahren erforderlich. Entweder sind neue Bauwerke für die verlängerte Zwischenlagerung zu errichten oder die bestehenden Bauwerke sind für eine Weiternutzung instand zu halten bzw. auf den aktuellen Stand der Technik zu ertüchtigen. Um eine Genehmigung bei Weiternutzung der bestehenden Zwischenlagergebäude zu erreichen, sollte der Zustand dieser Gebäude im Verlauf der Zeit wiederkehrend geprüft werden. Um die Schutzfunktion der Bauwerke zu gewährleisten, sind basierend auf den wiederkehrenden Prüfungen vorausschauend Instandsetzungen oder Verstärkungen der Gebäude zu planen und umzusetzen. Wir schlagen vor, dass dies im Rahmen einer adaptiven Lebensdauerprognose erfolgen soll. Dieses Prognoseverfahren für die Bauwerke erlaubt eine realitätsnahe Vorhersage, sowie eine Validierung und Überwachung der Restnutzungsdauer der Zwischenlagergebäude.

Die Einhaltung der Schutzziele wird hauptsächlich durch die Transport- und Lagerbehälter gewährleistet. Dabei muss der Behälter im finalen Schritt, also am Ende der Zwischenlagerung noch sicher zum Endlagerstandort transportiert werden können. Die Transportfähigkeit ist also eine wesentliche, aufrecht zu erhaltende Funktion des TLB die zum Endlagerstandort zur dortigen weiteren endlagergerechten Konditionierung. Da hierbei ein Doppelbarrierensystem zugrunde liegt, was im Zwischenlager durch das Primär- und Sekundärdeckelsystem gewährleistet wird, gibt es für den Ausfall einer dieser Barrieren schon etablierte Vorgehensweisen zur Reparatur dieses Versagens. Das Versagen der inneren Barriere wird dabei mit dem Aufschweißen eines Fügedeckels geheilt, welcher dann die Transportfähigkeit des TLB wieder sicherstellt. Da eine metallische Schweißnaht unter den Randbedingungen der Zwischenlagerung eine äußerst dauerhafte Dichtheit gewährleistet, besteht die Möglichkeit die TLB insgesamt zur Erreichung einer langfristigen Verlängerung der Zwischenlager damit für diese Zeitspanne der Zwischenlagerung und den anschließenden Transport zu ertüchtigen und die TLB dann erst in der Konditionierungsanlage wieder unter kontrollierten Bedingungen zu öffnen. Damit könnte der TLB an sich einen guten Beitrag zum Erreichen der langfristigen Zwischenlagerung beitragen. Für eine erwartete Zeitspanne der notwendigen verlängerten Zwischenlagerung von einem Jahrhundert oder länger ist aufgrund von Alterungsprozessen des Behältermaterials oder Korrosion keine Abnahme der Integrität der Transport- und Lagerbehälter zu erwarten.

Alterungsprozesse und Degradation der Behälterinventare sind, insbesondere im Fall ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren, ebenfalls zu bewerten. Die Integrität der Hüllrohre und anderer Strukturteile der Brennelemente ist zum einen für die Zwischenlagerung an sich, aber auch für die Handhabung, den Transport und eine Konditionierung bzw. Umlagerung von Relevanz. Wie eingangs erwähnt sind Zwischen- und Endlagerung miteinander verzahnt, und die Konditionierung der Behälterinventare stellt die entscheidende Schnittstelle zwischen der Zwischen- und Endlagerung dar.

Nach jetzigem Stand von Wissenschaft und Technik kann nicht ausgeschlossen werden, dass verschiedene Prozesse der Degradation der Brennstabhüllrohre sich während der verlängerten Zwischenlagerung fortsetzen oder verstärken. Unter anderem in Anbetracht dieses sicherheitstechnischen Aspekts sollte die notwendige verlängerte Zwischenlagerung möglichst zügig durch die Endlagerung abgeschlossen werden.

Wir gehen davon aus, dass Dialogangebote im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung und neuere Untersuchungen zur Weiterentwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik bezüglich der Stabilität und Integrität der Zwischenlagergebäude, -behälter und der zwischengelagerten Inventare zum Aufrechterhalten der Sicherheit entscheidend beitragen werden. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass bis zur Beantragung neuer Genehmigungen relevante Forschungsfragen wahrscheinlich noch nicht vollständig abgeschlossen sein werden. Um damit umzugehen, sollte neben wiederkehrenden Prüfungen sowie den periodischen Sicherheitsüberprüfungen aller 10 Jahre der Zwischenlageranlagen und Behälter zusätzlich eine begleitende Forschung zur Sicherheit der Bauwerke, Behälter und Inventare in die angestrebten Genehmigungen mit aufgenommen werden. Wichtig wird zudem der begleitende Erfahrungsaustausch zu den jeweiligen Ergebnissen sein, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen und den Zwischenlagerzeitraum sicher gestalten zu können.

Literaturverzeichnis

- ASKETA (2024) - Arbeitsgemeinschaft der Standortgemeinden kerntechnischer Anlagen in Deutschland, Grafenrheinfelder Erklärung, veröffentlicht unter <https://www.stadt-ahaus.de/de/aktuelles/meldungen/1160600.php>, 19.06.2024.
- AtG (1959): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz). Fassung vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3530)
- Atommüllkonferenz (2018): Positionspapier Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. 5.11.2018.
- AtSMV (1992): Verordnung über den kerntechnischen Sicherheitsbeauftragten und über die Meldung von Störfällen und sonstigen Ereignissen (Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung - AtSMV) mit Erläuterungen zu Anlage 5 AtSMV, Ausfertigungsdatum: 14.10.1992.
- AtVfV (1977): Verordnung über das Verfahren bei der Genehmigung von Anlagen nach § 7 des Atomgesetzes (Atomrechtliche Verfahrensverordnung - AtVfV). Fassung vom 22.03.2023.
- BAM (2022): BAM-Gefahrgutregeln (BAM-GGR) BAM-GGR 023, Maßnahmen zum Alterungsmanagement von zulassungspflichtigen Versandstücken für die Beförderung radioaktiver Stoffe, Rev 0 vom 20.06.2022.
- BASE (2020): Zwischenlager - Zwischenlagerung / Transport. Sicherheit und Sicherung. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/sicherheit_sicherung/sicherheit-bewertung.html; Fassung vom 29.12.2020.
- BASE (2021): Standorte der Zwischenlager - Zwischenlager Ahaus. <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/ahaus.html>; Fassung vom 15.10.2021.
- BASE (2022): Zwischenlager - Zwischenlagerung / Transport. Kurzinfo: Zwischenlager. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/kurzinfo-zwl/kurzinfo-zwl_node.html; Fassung vom 11.11.2022.
- BASE (2023): Standorte der Zwischenlager - Zwischenlager Gorleben. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-gorleben.html>; Fassung vom 20.07.2023.
- BASE – Broschüre (2023): Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle. Sicherheit bis zur Endlagerung. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. Broschüre; Fassung vom 04.2023.
- BGE (2022): Pressemitteilung Nr. 13/22 – Endlagersuche (19.12.2022). Bundesgesellschaft für Endlagerung; zuletzt geprüft am 08.07.2024.
- BGE-TEC (2023): Grenztemperatur – Prüfung der Machbarkeit in Bezug auf Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb. BGE TEC 2023-05. BGE Technology, Peine.

- Billone, M. C. et al. (2015): Billone, M.C., Burtseva, T., Martin-Rengel M.A. (2015): Effects of Lower Drying-Storage Temperatures on the DBTT of High-Burnup PWR cladding. FCRD-UFD-2015-00008. ANL-15121.
- Bonano, E. J. et al. (2018): Bonano, E.J., Kalinina, E.A., Swift, P.N. (2018): The Need for Integrating the Back End of the Nuclear Fuel Cycle in the United States of America. MRS Advances 3, 991–1003.
- BGZ (2023): Pressemitteilung vom 17.11.2023: CEO Bettina Hesse beim Forum Endlager-suche: „BGZ wird Öffentlichkeitsbeteiligung weiter ausbauen“. BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbh, zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- BMU (2020): Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abge-brannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesregierung für die siebte Überprüfungskonferenz im Mai 2021. Bun-desministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, August 2020.
- BMUV (2023): Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2022 und Prognose).
- BMUV (2024a): Arbeitskreis «Evaluation und Zeitplan Standortauswahlverfahren», Proto-koll der achten Sitzung am 15.03.2024. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz.
- BMUV (2024b): Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abge-brannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle, Bericht der Bundesregierung für die achte Überprüfungskonferenz im März 2025. Bun-desministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, August 2024.
- Bruder, S. (2007): Adaptive Modellierung der Dauerhaftigkeit im Zuge der Überwachung von Betonbauwerken. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig; Fassung von 2007.
- Chernykh, M. et al. (2011): Chernykh M., Kühl H., Tittelbach S., Graf R., Filbert W. (2011): Criticality Safety Analyses for Direct Final Disposal of CASTOR V Spent Fuel Transport and Storage Casks. ICNC 2011, Edinburgh.
- DAfStb (2007): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton. DAfStb Alkali-Richtlinie; Fassung vom 02.2007
- DIN 1045 (1988): DIN 1045 (1988-07-00 – 2001-07-00). Beton und Stahlbeton - Be-messung und Ausführung. Deutsches Institut für Normung e. V. ICS 91.100.30 Beton. Betonfertigteile; Fassung vom 1988-07-00.
- DIN EN (1991): DIN EN 1991-1 - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Allgemeine Einwirkungen.
- ESK (2015): ESK-Diskussionspapier der Entsorgungskommission vom 29.10. 2015 - Ver-längerter Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwi-ckelnder radioaktiver Abfälle. Entsorgungskommission, Bonn.
- ESK (2023a): Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern. Empfehlung der Entsor-gungskommission (ESK), verabschiedet in der 109. ESK-Sitzung am 07.09.2023. Ent-sorgungskommission, Bonn.

- ESK (2023b): Verlängerte Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger hochradioaktiver Abfälle in Abhängigkeit von der Auswahl des Endlagerstandorts, Positionspapier. Entsorgungskommission, Bonn; Fassung vom 20.03.2023.
- ESK (2024): Anforderungen an eine Periodische Sicherheitsüberprüfung für Endlager für schwach- und mittelfradioaktive Abfallstoffe. Entsorgungskommission, Bonn; Fassung vom 25.04.2024.
- Filbert, W. et al. (2011): Filbert, W., Tholen, M., Engelhardt, E. (2011): Disposal of Spent Fuel from German Nuclear Power Plants: The Third Option - Disposal of Transport and Storage Casks (Status) WM2011 Conference, Phoenix, Arizona.
- Graf, R. et al. (2012): Graf, R., Brammer, K.J., Filbert, W. (2012): Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern – ein umsetzbares technisches Konzept. Jahrestagung Kerntechnik, 2012.
- Graf, R. et al. (2010): Graf, R., Brammer, K.J., Filbert, W. (2010): Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern – Stand der konzeptionellen Überlegungen. Jahrestagung Kerntechnik, 2010.
- Grieger, C. et al. (2013): Grieger, C., Thiel, T. (2013): Betonschäden durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Neue Erkenntnisse aus dem Baustofflabor der HTW Dresden. HTW WISSEND. ISSN: 1433 - 4135; Erscheinungsdatum: September 2013.
- Grube, H. et al. (2001): Grube, H., Kerkhoff, B.: Die neuen deutschen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 als Grundlage für die Planung dauerhafter Bauwerke. Bontotechnische Berichte des VDZ. Düsseldorf; Veröffentlicht 2001.
- Habibi, F., et al. (2015): F. Habibi, S. A. Sheikh, N. Orbovic, D. K. Panesar and F. J. Vecchio: ALKALI AGGREGATE REACTION IN NUCLEAR CONCRETE STRUCTURES: PART 3: STRUCTURAL SHEAR WALL ELEMENTS. 23rd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Paper ID 044, Manchester; Fassung vom 14.08.2015.
- Hardin, E. et al. (2015): Hardin, E., Banerjee, K., J. Carter, R. Clark, J. Clarity, R. Howard, E. Kalinina, J. Scaglione (2015): Investigations of Dual-Purpose Canister Direct Disposal Feasibility. WM2015 Conference, March 15 – 19, 2015, Phoenix, Arizona, 15106, 1-14.
- Holst, A. et al. (2008): Holst, A., Budelmann, H., Wichmann, H.-J.: Drahtsensoren für das Korrosionsmonitoring von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig – Materialprüfanstalt für das Bauwesen Braunschweig; Fassung von 2008.
- IAEA (2016): Ageing Management of Concrete Structures in Nuclear Power Plants (No. NP-T-3.5). International Atomic Energy Agency, Wien; Fassung von Januar 2016.
- Johnson, L.H. et al. (2002): Johnson, L.H., Niemeyer, M., Klubertanz, G., Siegel, P., Gribi, P. (2002): Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay. NAGRA Technical Report 01-04. NAGRA, Wettingen.
- Kallenbach-Herbert et al. (2016): Kallenbach-Herbert, B.; Brohmann, B.; Küppers, C.; Schütte, S., Spieth-Achtnich, A.: Auswertung verschiedener Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung im Umfeld kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen. Öko-Institut e.V., Darmstadt

- König, T. et al. (2024): König, T., Herm, M., Metz, V., Rodriguez, Villagra, N., Elorrieta, J. M., Milena-Pérez, A., Bonales, L. J., Gutiérrez, L., Fernández-Carretero, S., Núñez, A., Galán, H., Király, M., Bertsch, J., Duarte, L. I., Goutam, K., Schneider, C., Zencker, U. (2024). Final version as of 10.05.2024 of deliverable D8.10 of the HORIZON 2020 project EURAD.
- Krohn, J. et al. (2024): Krohn, J., Spieth-Achtnich, A., Schütte, S., Mbah, M., Lampke, A., Hünecke, K., Fouquet, D., Kuhbier, J., Reinhardt, T. Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta), Darmstadt
- Leidinger T. (2024). Wegweisendes Urteil zur Zwischenlagerung in Deutschland; Spotlight in Nuclear Law; atw (4) 2024 Seiten: 25-27.
- Rowold, F. et al (2024): Rowold, F., Hummelsheim, K., Bartos, O., Grelle, T., Nicol, J. Spykman, G., Neles, J.M., Krob, F., Mbah, M.: Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Sicherheit der Behandlung bestrahlter Brennelemente, Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle und radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Bericht GRS-715, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln / Garching.
- Snyder, K. et al. (2013): Snyder, K., Lew, H. (2013), Alkali-Silica Reaction Degradation of Nuclear Power Plant Concrete Structures: A Scoping Study, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7937>; Fassung April 2013.
- Marchetti, M. et al (2022): Marchetti, M., Manenti, S., Herm, M., Metz, V. (2022): FLUKA study of actinides induced irradiation damage in Zircaloy-4 cladding during interim dry storage. Journal of Nuclear Materials 570, 153953, 1-11
- Neles, J. et al. (2023): Neles, J.M., Krob, F., Mbah, M. (2023): Zwischenlager und Region. Entwicklung eines methodischen Bewertungsansatzes zur Analyse der Einflussfaktoren und der Bedeutung eines Zwischenlagers für abgebrannte Brennelemente für eine Region. Bericht Zwischenlager und Region des Öko-Institut e. V. für das Vorhaben 4720E03366. Öko-Institut, Darmstadt.
- Neumann, W. (2017): Sicherheit und Strahlenschutz bei Genehmigungsverlängerung zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. In: Köhnke, D., Reichardt, M., Semper, F. (Hg.). Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Energie in Naturwissenschaft, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft. Springer, Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-19040-8_7.
- NBG (2024): Geschäftsordnung des Nationalen Begleitgremiums, geänderte Fassung vom 19.01.2024. Nationales Begleitgremium.
- Orbovic, N. et al. (2017): Orbovic, N., Philip, J., Blahoianu, A., Nevander, O.: Nuclear Safety, Final Report on the Phase 1 of the Assessment of Structures Subjected to Concrete Pathologies (ASCET), Alkali-Silica Reaction (ASR) Degradation of Nuclear Power Plant Concrete Structures; Nuclear Regulatory Commission, Rockville MD, USA; 07.2017.
- Rowold, F. et al. (2018): Rowold, F., Hummelsheim, K., Stuke, M. (2018): Open questions on the road to reliable predictions of cladding integrity. Kerntechnik, 83(6), 484-487.

- Röhlig, K.-J. (2023): Zum Zeitplan des Standortauswahlverfahrens für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland. In: *atw* 2023 (Vol.68 Ausgabe 4), S. 52–61.
- Röhlig, K.-J. et al. (2023): Röhlig, K.-J.; Thomauske, B. (2023): AG 1 Geologie und Technik im Rahmen des 2. Forums Endlagersuche, Präsentationen. Forum Endlagersuche. Veranstalter: BASE, 17.11.2023.
- Saurí, S. H. et al. (2017): Saurí Suárez, H., Pang, B., Becker, F., Metz, V. (2017): Monte-Carlo based comparison of the personal dose for emplacement scenarios of spent nuclear fuel casks in generic deep geological repositories. *ATW Atomwirtschaft-Atomtechnik, International Journal for Nuclear Power* 62, 384-390.
- Schubert, S. et al. (2009): Schubert, S.; Probst, U.; Winkler, H.-P. (2009): Behaviour of metallic seals in CASTOR casks under normal and accident conditions of transport: qualification requirements. In: *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material* 20 (4), S. 179–182. DOI: 10.1179/174651009X12555104004055.
- Sidky, P. S. (1998): Iodine stress corrosion cracking of Zircaloy reactor cladding: iodine chemistry (a review). *Journal of Nuclear Materials*, 256, 1-17.
- StandAG (2017): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). Fassung vom Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760)
- Stark, J. et al. (2013): Stark, J., Wicht, B. (2013): Dauerhaftigkeit von Beton (2.Aufl.). Springer Vieweg. ISBN 978-3-642-35277-5, 103-288.
- State Office for Nuclear Safety (2020): The Czech Republic National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.
- Tanaka, K. et al. (2006): Tanaka, K., Maeda, K., Sasaki, S., Ikusawa, Y., Abe, T. (2006): Fuel - cladding chemical interaction in MOX fuel rods irradiated to high burnup in an advanced thermal reactor. *Journal of Nuclear Materials*, 357, 58–68.
- Thomauske, B. (2023): Ist das Standortauswahlverfahren gescheitert? Auswahl von Endlagerstandorten für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle. In: *atw* 2023 (Vol. 68 Ausgabe 3), S. 7 - 22.
- TV Mainfranken (2024): Tagung der ASKETA – Endlagersuche für Atommüll geht weiter. Videobeitrag. Online verfügbar unter <https://www.tvmainfranken.de/mediathek/video/tagung-der-asketa-endlagersuche-fuer-atommuell-geht-weiter/>, zuletzt geprüft am 21.06.2024.
- UVPG (1990): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Fassung vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323).
- VGH München (2024): Bayerischer Verwaltungsgerichtshof; Urteil des 22. Senats vom 8. April 2024 AZ: 22 A 17.40026; Urteil zur Verpflichtungsklage auf Rücknahme/Widerruf einer atomrechtlichen Aufbewahrungsgenehmigung für Kernbrennstoffe in Transport- und Lagerbehältern der Bauart Castor V/52; Seiten 1-105
- Viswanathan, R. (2014): Fuel clad chemical interactions in fast reactor MOX fuels. *Journal of Nuclear Materials*, 444, 101-111.
- VwVfG (1976): Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG). Fassung vom 5. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236)

Wendler, N. (2023): Genese, Status quo und Zukunft der Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und hochradioaktiver Abfälle in Deutschland. In: *atw* Vol. 68 Ausgabe 3, S. 27–37.

Wagner, M. et al. (2020): Wagner, M., Reinicke, S., Kratzsch, A., Hampel, U. (2020): An analysis for detecting potential relocation of the inventory of dry storage containers during prolonged interim storage via changes in the wall temperature fields. *Nuclear Engineering and Design* 366 (2020) 110749. <https://doi.org/10.1016/j.nuceng-des.2020.110749>

Wimmer, H. et al. (2015): Wimmer, H., Skrzyppek, J., Köbl, M. (2015): CASTOR® and CONSTOR® A well-established system for the dry storage of spent fuel and high-level waste; *VGB Powertech*, Vol.: 95 – Issue 5/2015, pp 53-55.

Wolf, J. et al. (2012): Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R. (2012): FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Bericht zum Arbeitspaket 7. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln (GRS, 282).

Abbildungen

Abbildung 1: Zeitstrahl: Dauer der Zwischenlagerung bis zum Abschluss der Einlagerung in ein Endlager (Quelle KIT INE)	Seite 7
Abbildung 2: Überblick über die Vielfalt der TLB-Varianten aus der CASTOR®-Familie der GNS in Deutschland	Seite 11
Abbildung 3: Modell eines Druckwasserreaktor-Brennelements (links). Edelstahlkokillen mit simuliertem HAA-Glasprodukten (rechts). (Photos V. Metz)	Seite 16
Abbildung 4: Mikroskopaufnahme der Kontaktfläche zwischen dem Hüllrohr und abgebrannten Kernbrennstoff eines DWR-Brennstabsegments mit Abbrand von 50 GWd/t (links). Ausgebildete Wechselwirkungsschicht zwischen Kernbrennstoff und Hüllrohr durch anhaftenden Kernbrennstoff auf der Oberfläche (rechts). (Photos E. Gonzalez Robles, M. Herm, T. König)	Seite 20
Abbildung 5: Betonausgangsstoffe, Bohrkern, Bewehrungsstäbe (iBMB, TU Braunschweig)	Seite 24
Abbildung 6: Vorder- und Rückseite einiger Drahtsensoren (Holst 2008)	Seite 28
Abbildung 7: Konzept, adaptive Lebensdauerprognose	Seite 28
Abbildung 8: Zeichen des Widerstands bei Ahaus	Seite 30

Tabellen

Tabelle 1: Kenndaten von Zwischenlagern für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle in Deutschland	Seite 8
--	---------

