

Berichtszeitraum / Period 2025 - 1	Klassifikation / Classification	Fördernde Institution / Sponsor BMUKN	FKZ / Project Nr UMRS1621B
Vorhaben / Project Title VP: Zustandserfassung und Monitoring für die Bewertung der technischen Nutzungsdauer baulicher Anlagen von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle - TP: Nuklearspezifische Aspekte			
Condition detection and monitoring for the evaluation of the technical service life of structural facilities of interim storage facilities for highly radioactive waste - Nuclear-specific aspects			
Zuwendungsempfänger / Contractor Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH		Bewilligte Mittel / Funds 369,207.00 €	
Projektleiter/-in / Project Leader Sperbeck, Dr. Silvio		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in / E-Mail of PL Silvio.Sperbeck@grs.de	
Laufzeit des Vorhabens / Project Period 9/1/2023 - 11/30/2026		Berichtsdatum / Reporting Date 7/29/2025	

## 1 Zielsetzung des Vorhabens

Das Vorhaben wird als Verbundvorhaben von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführt.

Die nuklearen Zwischenlager sind baulich für 50 Jahre Lebensdauer und 40 Jahre Betriebsdauer ausgelegt. Es ist vorauszusehen, dass sie wesentlich länger benötigt werden, da ein Endlager frühestens 2050 zur Verfügung stehen wird. ZuMoBau-ZL zielt darauf ab, ein für die baulichen Anlagen in Zwischenlagern geeignetes Zustandserfassungs- und Monitoringkonzept samt Lebensdauerprognosemodellen zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Restnutzungsdauer möglichst realitätsnah vorhergesagt, verifiziert und überwacht werden kann. Hier werden Erfahrungen bei der Überwachung und den Lebensdauerprognosen baulicher Anlagen in anderen Bereichen (z.B. Infrastruktur) herangezogen und auf die speziellen Anforderungen von Zwischenlagern übertragen. Besonderer Wert wird auch auf die Datenerfassung, -speicherung und -verfügbarkeit gelegt.

## 2 Durchführungskonzept und Arbeitsprogramm

### 2.1 Einzelzielsetzungen

#### 2.1.1 Aufführung der Einzelziele

Im Einzelnen werden die nachfolgend aufgeführten, wissenschaftlich-technischen Ziele verfolgt:

- Erfassung der Bandbreite von Alterungs- bzw. Degradationsprozessen auf Zwischenlager unter Berücksichtigung realer Betriebserfahrung (inkl. Kombinationen) sowie Entwicklung einer Ausschlussmethodik unmaßgeblicher Prozesse bspw. für unterschiedliche Bauweisen und Standorte (GRS, iBMB)
- Identifikation der maßgeblichen Schädigungsprozesse von Zwischenlagern und zugehöriger Modelle zu deren Beschreibung sowie von Modellen zur Beurteilung und Prognose des Bauwerkswiderstands (iBMB, GRS)
- Bewertung bzw. Wichtung dieser Parameter im Hinblick auf deren Auswirkungen auf die Betriebssicherheit und die Schutzfunktion der Zwischenlager wie z.B. dynamische Festigkeit,

Strahlenschutz etc. (GRS, iBMB)

- Adaption u.a. aus dem Brückenbau bekannter Zustandsbewertungsmethoden (Bauwerksprüfung nach DIN 1076 /DIN 99/ oder VDI 6200 /VDI 10/) für die besonderen Belange der Zwischenlager (BAM)

- Ableitung geeigneter Sensoren und Messtechniken für die Erfassung globaler (z.B. Durchbiegung, Lufttemperatur) und lokaler Parameter (wie Dehnung, Rissbildung, Betondegradation, Feuchte) – auf Basis der vorstehenden Ergebnisse – unter Berücksichtigung der kerntechnisch bedingten Besonderheiten von Zwischenlagern, sowie deren Test und ggf. Optimierung (BAM, iBMB)

- Identifikation geeigneter Lebensdauerprognosemodelle für bauliche Anlagen in Zwischenlagern mit erheblich verlängerten Nutzungsdauern (iBMB, GRS)

- Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von geeigneten Modellen und Methoden für eine adaptive Lebensdauerprognose unter Berücksichtigung der Monitoringdaten (iBMB, GRS)

- Entwicklung eines Prozesses für die Festlegung von Schwellwerten für (noch zu identifizierende) Zustandsparameter aus Messungen und Zustandsprognosen für notwendige Instandhaltungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen. (iBMB, GRS, BAM)

- Ermittlung und Weiterentwicklung geeigneter Konzepte und Schnittstellen zur sinnvollen Ablage von Monitoring- und Zustandsdaten für die Lebensdauerprognose sowie für die Verwendung durch weitere berechnete Beteiligte, wie Betreiber, Behörden oder Tragwerksplaner, sowie Schnittstellen zu BIM (Building Information Modeling) und/oder Bauwerksmanagementsystemen, Implementation des Konzepts „Digitaler Zwilling“ (GRS, BAM, iBMB)

## **2.2 Arbeitsprogramm**

### **2.2.1 Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung sowie Betriebserfahrung**

Das Arbeitspaket AP 1 befasst sich vorrangig mit der Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung sowie der entsprechenden Betriebserfahrung.

### **2.2.2 Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern (BAM, iBMB)**

Im Arbeitspaket AP 2, welches sich mit der Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern beschäftigt, ist die GRS nicht beteiligt.

### **2.2.3 Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten (iBMB, BAM, GRS)**

AP 3 zielt auf die Entwicklung eines spezifischen Konzeptes zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten ab.

### **2.2.4 Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling (BAM, GRS, iBMB)**

AP 4 fokussiert sich auf die Datenhaltung, erforderliche Schnittstellen (bspw. zum Building Information Model (BIM)) und auf die Entwicklungen hinsichtlich eines Digitalen Bauteilzwillings unter Berücksichtigung von Monitoring- und Messdaten sowie Informationen zur Lebensdauerprognose.

### **3 Versuchseinrichtungen**

Der Großversuchsstand „Concerto“ der TU Braunschweig wird als Hauptversuchsanlage für die Arbeitspakete 2, 3 und 4 genutzt. Die damit verbundenen Aktivitäten haben begonnen.

### **4 Rechenprogramme**

Computercodes, z. B. für Datenbanksoftware, Datenaustausch und -transfer, werden in AP 4 entwickelt.

### **5 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

#### **zu 2.2.1 Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung sowie Betriebserfahrung**

Es wurde eine Liste möglicher Alterungs- und Schädigungsprozesse in Zwischenlagern verschiedener Bauarten und Standorte angefertigt. Diese geht weit über die in DIN EN 206 und DIN 1045-2 genannten Schädigungsmechanismen hinaus und geht auch auf spezifische Schädigungsmechanismen für die Zwischenlagerbauwerke ein. Die Liste enthält darüber hinaus nun auch die auftretenden Schadensbilder und Erscheinungen, eine Beschreibung des Schadensmechanismus, zugehörige Normen und in ausgewählten Fällen eine Übersicht von Modellen, mit denen der Schadensmechanismus beschrieben werden kann.

Die Liste wurde beim zweiten Projektgespräch (erstes des Jahres 2024) am 21. und 22.06.2024 am Standort Lubmin dem fachlichen Begleitausschuss vorgestellt und diskutiert. Bei der systematischen Erfassung des Bauwerkszustandes kann die Liste sehr hilfreich sein. Dabei konnte das Zwischenlager Nord der EWN besichtigt und Betriebserfahrung mit Fachleuten vor Ort besprochen werden.

Im März 2024 erfolgte eine Teilnahme der GRS als End-User am Projektmeeting des EU-Projektes ACES in Aix-en-Provence (Frankreich). Auf dieser Veranstaltung wurden wertvolle Erkenntnisse zu wichtigen Schädigungsmechanismen und Betriebserfahrung von kerntechnischen Anlagen gewonnen, sowie die neusten Methoden zu deren Modellierung vorgestellt und diskutiert. Besonders hilfreich für ZuMoBau-ZL sind von ACES der AP 1 (Stand der Technik bei der quantitativen Bewertung der Alterung von Beton) und der AP 3 (Vorhersage und Monitoring von Treiberscheinungen). Aber auch der AP 2 von ACES (Bewertung der Korrosion von in Beton befindlichen Linern) und AP 5 (Bewertung der Leistungsfähigkeit von bestrahltem Beton) könnten teilweise hilfreich werden. Darüber hinaus ergaben sich wichtige Erkenntnisse zur Anwendung von BIM im kerntechnischen Bereich und zukünftige Möglichkeiten. Hilfreiche Kontakte wurden geknüpft und ein Informationsaustausch initiiert. Im April 2025 nahm die GRS am Final Workshop des EU-Projektes ACES in Belgien teil. Durch die Teilnahme konnte ein Update zu den fortgeführten Forschungen in ACES und somit des bisherigen Wissens zu den vorstehenden Themen erlangt werden. Nützliche Informationen für ZuMoBau-ZL wurden bzw. werden aktualisiert und dokumentiert. Die letzten Berichte von ACES sollen in Kürze zur Verfügung stehen.

Auf einer Veranstaltung der OECD/NEA zur baulichen Alterung (Arbeitsgruppe IAGE) im März 2024 wurde das Potential und die zunehmende Wichtigkeit von BIM für das Alterungsmanagement und die damit einhergehende, notwendige Datenhaltung dem Auditorium dargelegt. Diese Aktivitäten der GRS wurden auf dem darauffolgenden Meeting im März 2025 fortgesetzt und ausgebaut. Es wurde damit begonnen, die Möglichkeit einer gemeinsamen internationalen Aktivität (s.g. CAPS) auszuloten und in einem ersten Schritt ein internationales Questionnaire zu starten.

Weiterhin wurden hilfreiche Erkenntnisse aus der IAEA-Arbeitsgruppe zu Alterung von Bauwerken (IGALL WG3) gewonnen. So bezieht sich bspw. das Alterungsmanagementprogramm (AMP) 323 „Spent fuel dry storage concrete structures“ auf die Bauwerke der trockenen Zwischenlagerung, welches insbesondere hinsichtlich der Betriebserfahrung im Jahr 2024 überarbeitet wurde. Auf einem Meeting im Mai 2025 der IGALL WG3 wurden die Arbeiten eines Entwurfs eines neuen AMP 325 „Near surface disposal facility“ für oberflächennahe Endlager für schwach radioaktive Abfälle nahezu abgeschlossen. Vor der Veröffentlichung in finaler Form muss das AMP 325 noch die IAEA-internen Überprüfungen und Freigabeprozessen passieren.

Die Arbeiten zur Ausschlussmethodik wurden weitgehend finalisiert. Überlegungen und Arbeiten zur Bewertung bzw. Wichtung identifizierter Einwirkungs- und Widerstandsparameter erfolgten im Hinblick auf deren Auswirkungen, wie auch zu erforderlichen Genauigkeiten der verschiedenen Messtechniken (Akzeptanzkriterien).

#### **zu 2.2.2 Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern (BAM, iBMB)**

Die GRS ist nicht beteiligt.

#### **zu 2.2.3 Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten (iBMB, BAM, GRS)**

In AP 3 wurde ein Konzept für die adaptive Lebensdauerprognose von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen erarbeitet. Dazu wurden Möglichkeiten der Parameteradaption in den in AP 1 identifizierten Schädigungsmodellen getestet. Voraussetzung hierfür war die Aufbereitung der Sensordaten aus den in AP 2 identifizierten Sensortypen für die Parameteradaption. Ein analoges Vorgehen wurde für den Schadensfall der Karbonatisierung umgesetzt. Dabei wurde das Konzept der adaptiven Lebensdauerprognose auf gängige Modelle zur Beschreibung der Karbonatisierungstiefe übertragen. Im Unterschied zur Betrachtung der Chloridbelastung standen hier keine kontinuierlich erfassten Sensordaten zur Verfügung. Stattdessen erfolgt die bisherige Adaption der Modellparameter auf Grundlage vorliegender Inspektionsdaten, wie etwa gemessener Karbonatisierungstiefen aus Bauwerksprüfungen. Diese wurden zeitlich zugeordnet und in die Prognosemodelle integriert, um eine zustandsabhängige Aktualisierung der Lebensdauerabschätzung zu ermöglichen.

In 2024 und 2025 wurden Dienstreisen zur OECD/NEA durchgeführt, um an Arbeitstreffen der CSNI WGIAGE (Working Group on Integrity and Ageing of Components and Structures) teilzunehmen. Dort konnte u.a. die Erkenntnis gewonnen werden, dass die Anwendung von adaptiven Lebensdauerprognosen im kerntechnischen Bereich noch sehr ausbaufähig zu sein scheint.

#### **zu 2.2.4 Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling (BAM, GRS, iBMB)**

Ein Kick-off-Meeting zum AP 4 mit allen Beteiligten wurde im Dezember 2024 durchgeführt. Es wurde damit begonnen, die Datenformate und -typen zusammenzustellen und geeignete Datenablagemethoden zu entwickeln. An der Versuchsbrücke "Concerto" wurden im 2. Halbjahr 2024 Voruntersuchungen zusammen mit der BAM vorgenommen.

Im 1. Halbjahr 2025 wurden zur regelmäßigen Abstimmung der Arbeiten Videokonferenzen mit allen Beteiligten durchgeführt. Es wurden weitere Datenformate und -typen zusammengestellt und geeignete Datenablagemethoden zunehmend entwickelt. Auf Grundlage der Voruntersuchungen an der Versuchsbrücke „Concerto“ wurden verschiedene Sensoren

nachträglich in das Bauwerk integriert. Ein Großteil dieser Sensoren wurde so installiert, dass eine kontinuierliche Erfassung und Übertragung der Messdaten ermöglicht wurden. Hierzu sind die Sensoren mit Datenloggern verbunden, die eine direkte Speicherung der erfassten Werte in einer zentralen Datenbank über das Internet erlauben. Dieses soll im weiteren Verlauf des Projektes ein dauerhaftes, digitales Monitoring und die fortlaufende Datennutzung im Rahmen der adaptiven Lebensdauerprognose ermöglichen. Zudem wurden die Planungen für den anstehenden Belastungstest des Versuchsbauwerks abgeschlossen, sodass zeitnah mit der Versuchsdurchführung begonnen werden kann.

## **6 Geplante Weiterarbeit**

### **zu 2.2.1 Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung sowie Betriebserfahrung**

Die Liste der Schadensmechanismen mit all ihren weiteren Informationen, wie bspw. Schadensmodellen, Parametern, Randbedingungen, Messtechnik usw. wird im Laufe des Projektes mit zunehmendem Erkenntnisgewinn ergänzt. Die zusammengestellten Schadensmechanismen werden zunehmend klassifiziert und die im Weiteren näher zu analysierenden Mechanismen werden fortwährend ausgewählt. Für diese selektierten Schadensmechanismen werden weitere zugehörige Modelle zusammengestellt und jeweils auf ihre Eignung für eine adaptive Lebensdauerprognose von Zwischenlagerbauwerken untersucht.

Darüber hinaus soll mit Gewichtungen jener Einflussgrößen fortgefahren werden, die aufgrund ihrer Unsicherheiten einen besonders signifikanten Einfluss auf die Lebensdauerprognose von Bauwerken ausüben. Ziel ist es, die relevanten Parameter zu identifizieren, deren Überwachung für eine zuverlässige und adaptive Zustandsbewertung besonders entscheidend ist.

### **zu 2.2.2 Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern (BAM, iBMB)**

Die GRS ist nicht beteiligt.

### **zu 2.2.3 Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten (iBMB, BAM, GRS)**

Fortsetzung von Tests mit ausgewählten Sensoren und Überprüfung der Eignung für das adaptive Lebensdauermanagement. Hier wurden bereits unterschiedliche Sensoren in der Versuchsbrücke Concerto verbaut (siehe AP 4).

### **zu 2.2.4 Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling (BAM, GRS, iBMB)**

Hinsichtlich des AP 4 ist zu berücksichtigen, dass für die qualitätsgesicherte Ablage von Mess- und Monitoringdaten ein Datenbanksystem für große, heterogene Daten und Metadaten i. A. notwendig ist. Die Arbeiten zur Strukturierung eines Datenbanksystems unter potentieller Nutzung einer an der BAM entwickelten Ontologie für die ZfP im Bauwesen und Erweiterung dieser sollen fortgesetzt werden. Durchführung eines Belastungstests an der Versuchsbrücke "Concerto" mit Erfassung aller Sensordaten. Erstellen von Schnittstellen zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Daten und zu deren Auswertung mit adaptiver Lebensdauerprognose. Erarbeitung einer Visualisierung der erzielten Messergebnisse.

## **7 Beziehung zu anderen Vorhaben**

Die Vorhaben der Förderkennzeichen RS1553A+B, RS1563, und 4723R01540 wurden als nützlich identifiziert und teilweise bereits in den Bearbeitungsprozess integriert. Der Kontakt zum Vorhaben (BetoNPP) wird über den Kontakt der BAM zum Fraunhofer IZfP in Q1/2024 hergestellt.

## **8 Berichte und Veröffentlichungen**

Im Rahmen der ICARST 2025 (Third International Conference on Applications of Radiation Science and Technology) präsentierte die BAM ein wissenschaftliches Poster mit dem Titel "Condition Monitoring for Lifetime Extension of Interim Storage Facilities". Im Mittelpunkt stand dabei die Vorstellung verschiedener Mess- und Monitoringtechniken zur Erfassung relevanter Materialparameter, die eine zustandsbasierte Bewertung und ggf. Lebensdauerverlängerung von Zwischenlagerbauwerken ermöglichen.

Beim SEDS 2025 – 9th Workshop on the Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel wurde der aktuelle Zwischenstand des Projekts durch das iBMB vorgestellt. Der Fokus der Präsentation lag auf dem Konzept der adaptiven Lebensdauerprognose Mithilfe von Korrosionsdrahtsensoren. Ergänzend zur Präsentation wurde ein dreiseitiger Artikel mit dem Titel "Adaptive Service Life Management for Concrete Building Structures of Interim Nuclear Storage Facilities" verfasst und eingereicht.

Beim anstehenden Forschungssymposium des BASE (SafeND 2025) wird durch die GRS das Projekt ZuMoBau-ZL vorgestellt. Das hierzu eingereichte Abstract mit dem Titel "ZuMoBau-ZL – Providing Methods to Ensure Extended Lifetime for Structures in Interim Storage Facilities" wurde angenommen und für eine Präsentation im Rahmen des Workshops ausgewählt.

## **9 Zugänglichkeit der Berichte**

Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB) // Forschungsstelle // GRS, Projektträger/Behördenunterstützung, Köln