

Berichtszeitraum / Period 2025 - 1	Klassifikation / Classification	Fördernde Institution / Sponsor BMUKN	FKZ / Project Nr 1501668A
Vorhaben / Project Title VP: Zustandserfassung und Monitoring für die Bewertung der technischen Nutzungsdauer baulicher Anlagen von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle - TP: adaptives Lebensdauermanagement für Zwischenlagerbauwerke aus Stahlbeton			
Collaborative project: Condition assessment and monitoring for the evaluation of the technical service lifetime of building structures of interim nuclear storage facilities, subproject: adaptive service life management for interim storage structures made of reinforced concrete			
Zuwendungsempfänger / Contractor Technische Universität Braunschweig		Bewilligte Mittel / Funds 335,170.36 €	
Projektleiter/-in / Project Leader Lowke, Prof. Dr.-Ing. Dirk		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in / E-Mail of PL d.lowke@ibmb.tu-bs.de	
Laufzeit des Vorhabens / Project Period 9/1/2023 - 11/30/2026		Berichtsdatum / Reporting Date 7/23/2025	

## 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 Einzelzielsetzungen

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

2024-2 1501668A 2/4

Betriebssicherheit und die Schutzfunktion der Zwischenlager wie z. B. dynamische Festigkeit, Strahlenschutz etc. (GRS, iBMB)

- Adaption u. a. aus dem Brückenbau bekannter Zustandsbewertungsmethoden (Bauwerkprüfung

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 berechtigte 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 **AP 1: Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung, sowie Betriebserfahrung (GRS, iBMB)**

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

### 2.2.3 **AP 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 **AP 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.

## 2.2.4 **AP 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.

## 4 **Rechenprogramme**

Computercodes, z.B. für die adaptive Lebensdauerprognose, den Datenaustausch und -transfer.

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

### zu 2.2.1 **AP 1: Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung, sowie Betriebserfahrung (GRS, iBMB)**

Es wurde eine Liste möglicher Alterungs- und Schädigungsprozesse in Zwischenlagern verschiedener Bauarten und Standorte angefertigt. Diese geht über die in DIN EN 206 und DIN 1045-2 genannten Schädigungsmechanismen hinaus und geht auch auf spezielle Schädigungsmechanismen für die Zwischenlagerbauwerke ein. Die Liste enthält die auftretenden Schadensbilder und Erscheinungen, eine Beschreibung des Schadensmechanismus, die zugehörige Normen und in ausgewählten Fällen eine Übersicht von Modellen, mit denen der Schadensmechanismus beschrieben werden kann. Die Liste wurde bei den Projekttreffen vorgestellt und mit dem Begleitausschuss diskutiert. Darüber hinaus wurde eine Ausschussmethodik entwickelt, mit der in zwei Stufen, maßgebende Schadensmechanismen für den jeweiligen Zwischenlagerstandort identifiziert werden und zugleich die Tiefe der Untersuchungen festgelegt wird.

### zu 2.2.3 **AP 3: Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten (iBMB, BAM, GRS)**

In AP3 wurde ein Konzept für die adaptive Lebensdauerprognose von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen erarbeitet. Dazu wurden Möglichkeiten der Parameteradaption in den in AP1 identifizierten Schädigungsmodellen getestet. Voraussetzung hierfür war die Aufbereitung der Sensordaten aus den in AP2 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.

### zu 2.2.4 **AP 4: Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling (BAM, GRS, iBMB)**

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 wird. Hierzu sind die Sensoren mit Datenloggern verbunden, die eine direkte Speicherung der erfassten Werte in einer zentralen Datenbank über das Internet erlauben. Dieses erlaubt im weiteren Verlauf des Projektes ein dauerhaftes, digitales Monitoring und die fortlaufende Datennutzung im Rahmen der adaptiven Lebensdauerprognose. Zudem wurden die Planungen für den anstehenden Belastungstest abgeschlossen, sodass zeitnah mit der Versuchsdurchführung begonnen werden kann.

#### zu 2.2.4 **AP 4: Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling (BAM, GRS, iBMB)**

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 wird. Hierzu sind die Sensoren mit Datenloggern verbunden, die eine direkte Speicherung der erfassten Werte in einer zentralen Datenbank über das Internet erlauben. Dieses erlaubt im weiteren Verlauf des Projektes ein dauerhaftes, digitales Monitoring und die fortlaufende Datennutzung im Rahmen der adaptiven Lebensdauerprognose. Zudem wurden die Planungen für den anstehenden Belastungstest abgeschlossen, sodass zeitnah mit der Versuchsdurchführung begonnen werden kann.

### 6 **Geplante Weiterarbeit**

#### zu 2.2.1 **AP 1: Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung, sowie Betriebserfahrung (GRS, iBMB)**

Die Liste der Schadensmechanismen wird im Laufe des Projektes mit zunehmendem Erkenntnisgewinn ergänzt. Die zusammengestellten Schadensmechanismen werden klassifiziert und die im Weiteren näher zu analysierenden Mechanismen werden ausgewählt. Für diese ausgewählten Schadensmechanismen werden die zugehörigen Modelle zusammengestellt und jeweils auf ihre Eignung für eine adaptive Lebensdauerprognose von Zwischenlagerbauwerken untersucht.

Darüber hinaus soll eine Gewichtung jener Einflussgrößen erfolgen, 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 2.2.3 **AP 3: Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten (iBMB, BAM, GRS)**

Die Besonderheiten von Zwischenlagern für radioaktive Abfälle, wie z. B. große Wandstärken, sehr hohe Bewehrungsgehalte, radioaktive Strahlung oder eingeschränkte Zugänglichkeit sind bei der Betrachtung der Prognosemodelle noch zu berücksichtigen.

#### zu 2.2.4 **AP 4: Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling (BAM, GRS, iBMB)**

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.

**zu 2.2.4 AP 4: Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling (BAM, GRS, iBMB)**

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**

Es gab einen Austausch mit Vertretern des Fraunhofer IZfP zum Projekt BetoNPP. Es wurden keine thematischen Überschneidungen festgestellt.

**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 Bericht mit dem Titel "Adaptive Service Life Management for Concrete Building Structures of Interim Nuclear Storage Facilities" verfasst und eingereicht. SEDS

Beim anstehenden Forschungssymposium des BASE (SafeND 2025) wird durch die GRS das Projekt ZuMOBau-ZL vorgestellt. Das hierzu eingereichte Abstract mit dem Titel "Zu-MoBau\_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**

Die Veröffentlichungen sind teilweise auf den Internetseiten der Konferenzen veröffentlicht. Zudem werden die Berichte und die zugehörigen Daten über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren auf den Backup-gesicherten Laufwerken des iBMB gemäß der iBMB eigenen Datenmanagement-Richtlinie gespeichert. Die Daten können auf Anfrage herausgegeben werden.