

Berichtszeitraum / Period 2025 - 1	Klassifikation / Classification	Fördernde Institution / Sponsor BMUKN	FKZ / Project Nr 1501668C
Vorhaben / Project Title VP: Zustandserfassung und Monitoring für die Bewertung der technischen Nutzungsdauer baulicher Anlagen von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle - TP: Sensorik und Datenmanagement			
Project topic: Condition detection and monitoring for the evaluation of the technical service life of structural facilities of interim storage facilities for highly radioactive waste. Subproject topic: Sensor technology and data management			
Zuwendungsempfänger / Contractor Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)		Bewilligte Mittel / Funds 269,629.08 €	
Projektleiter/-in / Project Leader Niederleithinger, PD Dr. Ernst		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in / E-Mail of PL ernst.niederleithinger@bam.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 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 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 berechnigte 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 AP1: 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 AP2: Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern

Arbeitspaket AP 2 beschäftigt sich mit der Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern.

2.2.3 AP3: Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten

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

2.2.4 AP4: Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling

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.

2.2.5 **Verwaltung, Sonstiges**

Projektverwaltung und Management, sonstige Aktivitäten.

3 **Versuchseinrichtungen**

Der Großversuchsstand "Concerto" der TU Braunschweig wird als Hauptversuchsanlage für die Arbeitspakete 2, 3 und 4 genutzt. Erste Versuche haben im September 2024 begonnen (siehe AP2). Diese werden in AP3 seit Frühjahr 2025 fortgesetzt.

4 **Rechenprogramme**

Computercodes, z.B. für den Datenaustausch und -transfer, werden primär in WP4 entwickelt. Über einzelne Skripte und Codes wird auch bei AP2 und AP3 berichtet.

5 **Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

zu 2.2.1 **AP1: Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung, sowie Betriebserfahrung**

Die BAM ist an AP1 nicht beteiligt

zu 2.2.2 **AP2: Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern**

Das AP2 ist abgeschlossen. Außer der Reihe erhielt die in AP2.1/2.2 entwickelte Methodenmatrix ein Update. Darin wurden einige Bewertungen verfeinert und die Methoden- und Messaufgabenliste nach den Ergebnissen von AP1 ergänzt. Zu dem wurde ein Farbschema gewählt, das Farbenblindheit berücksichtigt.

zu 2.2.3 **AP3: Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten**

In AP3 wurden seitens der BAM 1) Entwicklungsarbeiten aus AP2 finalisiert und 2) der Versuchsträger Concerto instrumentiert.

1) Entwicklungsarbeiten

Anhand der Erfahrung aus dem letzten Berichtszeitraum wurde ein neuer Mikrocontroller (st32-L051 xxxx) mit 64 kB Speicher gewählt. Dafür wurde eine kompakte Entwicklungsplatine entworfen, damit alle Anschlüsse getestet werden konnten. Daraufhin wurde eine neue Revision der ZuMoBau-NFC Platine entworfen, welche alle Sensoren und Komponenten vereint.

Die neue Revision wurde so gestaltet, sodass verschiedene Antennen montiert und getestet werden können. Es wurden verschiedene Antennen mit einem Durchmesser von 60mm mit verschiedenen Windungszahlen entworfen, nach Fertigung getestet und in ihrer Induktivität vermessen, welche maßgeblich zur Effektivität der zu übertragenen Leistung beeinflusst. Die Induktivität wurde mit einer LCR-Meter / Messbrücke und manuell mit Hilfe eines Oszilloskops vermessen. Darauf folgend wurden Bodediagramme der Schwingkreise (Antenne + NFC Sensor), um die Frequenzantwort zu ermitteln. Dabei wurde die Amplitude der induzierten Spannung bei der Zielfrequenz von 13,65 MHz zu maximiert.

Ein Gehäuse wurde passgenau entworfen, welches eine Luftdurchlässige Teflon Membran

mit einer Porengröße von 100 µm für den Gasaustausch besitzt. Das Gehäuse wurde in FreeCAD entworfen und mit einem 3D Drucker mit PLA gedruckt. Nach dem ein Sensor eingesetzt wurde ist das Gehäuse mit Epoxidharz, bis auf die Fläche der Teflon Membran, versiegelt worden.

Um die Sensoren auszulesen zu können, wurde eine kommerziell erhältliche Kombination aus Entwicklerboard (NUCLEO-L476RG) und NFC Leseeinheit (X-NUCLEO-NFC09A1) eingesetzt. Der dazugehörige demonstrativen Programmablauf musste angepasst werden. Die Demo hat nur die ersten Speicheradressen des NFC-Chips (ST25dv) in dem die Messwerte abgelegt worden sind, am NFC-Sensors verbaut, ausgelesen. Die Anpassung der Leseeinheit zielte darauf ab, eine Vielzahl von Speicheradressen auszulesen.

Die nun ausgelesenen Informationen (UID, p, T, rH) des NFC-Sensors können nun von der Leseeinheit über die serielle Schnittstelle (UART/USB) zur weiteren Verarbeitung an einen Rechner geschickt werden.

Um den derzeitigen Stand der Entwicklung festzuhalten, wurden die Design-Dateien der Platinen und des Gehäuses, die Firmware des NFC-Sensors und der Leseeinheit, aber auch die Verwaltungsskripte zur Abspeicherung der Rohdaten in dem Github-System der BAM abgelegt und umfänglich dokumentiert. Anleitungen und Materiallisten folgen.

2) Versuchsträger Concerto:

Zehn NFC-Sensoren, mit drei verschiedenen aber schon optimierten Antennenentwürfen, wurden händisch hergestellt und in 3D gedruckte Gehäuse mit Teflon-Membran verbaut. Die Gehäuse wurden mit Epoxidharz versiegelt, sodass kein Wasser eindringen kann. Die Teflon-Membran wurde nicht mit Epoxidharz benetzt. Neun der Zehn NFC-Sensoren wurden daraufhin in die Testbrücke "CONCERTO" der TU-Braunschweig verbaut. Ein NFC-Sensor verblieb in der BAM. Für den Einbau wurde mit Hilfe von Radarmessungen die Bewehrung der CONCERTO Brücke verortet, um bei den folgenden Arbeiten Schäden zu vermeiden. Anschließend wurde mit einem Kernbohrer mit 80mm Durchmesser circa 4 cm tief (entsprechend der Tiefenlage der Bewehrung) gebohrt und der Beton ausgestemmt. Die Sensoren wurden in drei verschiedene Bereichen entsprechend der Versuchsplanung der TU Braunschweig verbaut und die Löcher mit Pegel VT10 Vergussmörtel verschlossen. Bei Fünf der Neun NFC-Sensoren wurde der Vergussmörtel mit 38% Kalkschweißmörtel angesetzt, da dieses Verhältnis den Betoneigenschaften der CONCERTO-Brücke ähnelt. Bei diesem Mischungsverhältnis sei der Feuchtigkeitstransport begünstigt.

In einem folgenden Besuch der CONCERTO-Brücke der TU-Braunschweig wurden die ersten Messungen vorgenommen. Es hat sich gezeigt, dass acht von neun NFC-Sensoren voll funktionstüchtig sind. Der defekte Sensor kann ausgelesen werden, aber die Messwerte aktualisieren sich nicht. Ursache dafür kann ein zu großer Abstand zwischen Leseeinheit und Sensor liegen, oder/und die eingesetzte Antenne mit 7 Wicklungen ist für den Einsatz ungeeignet. Alle weiteren Sensoren wurden seitdem mehrfach erfolgreich ausgelesen.

Zusätzlich wurden 7 Ultraschall-Transducer Typ ACS S0807 in den drei Bereichen eingesetzt. Sie werden ebenfalls zur Dauerüberwachung der Betonstruktur eingesetzt. Materialveränderungen (etwa durch Korrosion) machen sich durch subtile Veränderungen in den Ultraschallsignalen bemerkbar und können mit sensitiven Verfahren wie der Codawelleninterferometrie (CWI) detektiert werden. Die Ultraschalltransducer sind mit einem Messgerät (BAM-Eigenbau) verbunden und liefern seit Juni 2025 kontinuierlich Daten, die automatisch an die BAM übertragen werden. Die Einstellung von Messparametern kann ebenfalls aus der Ferne erfolgen.

zu 2.2.4 **AP4: Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling**

Für die lokale Datenverwaltung der NFC-Sensoren wurde in Python ein Skript zur Interpretation und Abspeicherung der Rohdaten geschrieben. Dabei wurde die eindeutige Identifikationsnummer (UID) herangezogen, um zu prüfen, ob ein Sensor schon einmal eingelesen wurde. Wurde ein Sensor noch nie erfasst, so wird automatisch eine .csv Datei mit der eindeutigen Identifikationsnummer erzeugt, um die ausgelesenen Daten abzuspeichern. Liegt bereits eine .csv Datei vor, so werden darin die Daten inklusive Erfassungsdatum und Uhrzeit bei jeder Messung abgespeichert. Wurden allerdings die identischen Messwerte im Vergleich zur vorherigen Messung eines Sensors erfasst, ist davon auszugehen dass der Sensor seine Messwerte nicht aktualisiert hat und somit ein Fehler vorliegt.

Ein weiteres Python Skript visualisiert die abgespeicherten Messwerte eines oder mehrerer Sensoren.

Für die Ultraschallmessdaten erfolgt vorerst eine lokale Datenverarbeitung.

zu 2.2.5 **Verwaltung, Sonstiges**

Während des 3. Projekttreffens am 27. 11. 2024 in Berlin wurden die bisherigen Ergebnisse den Projektpartnern und dem Begleitausschuss vorgestellt und diskutiert. Schwerpunkt waren dabei die Methodenmatrix aus AP2 und die Pläne für die Instrumentierung des Versuchsträgers Concerto in AP3. Das Feedback fließt in die weitere Arbeit ein.

6 **Geplante Weiterarbeit**

zu 2.2.1 **AP1: Identifikation und Wichtung maßgeblicher Schadensmechanismen und -modelle zu deren Beschreibung, sowie Betriebserfahrung**

Die BAM ist an AP1 nicht beteiligt

zu 2.2.2 **AP2: Wahl geeigneter Monitoring- und Messtechniken für jeweilige Alterungs- und Degradationsprozesse von Zwischenlagern**

Einige für AP2 vorgesehene Arbeiten zu Sensorik-Entwicklung und Tests konnten, wie im letzten Bericht beschrieben, noch nicht abgeschlossen werden. Es wurde beschlossen, diese Arbeiten in AP3 fortzusetzen, da AP2 formal beendet ist. Die in AP2.1/2.2 entwickelte Methodenmatrix erhält nach Vorliegen der Ergebnisse von AP3 ein weiteres Update.

zu 2.2.3 **AP3: Spezifische Konzepte zur Lebensdauerprognose von Zwischenlagern anhand von Monitoringdaten**

Für ein tägliches oder wöchentliches Auslesen der NFC-Sensoren wird momentan ein weiteres Auslesegerät aufgebaut. Bei dem Bau des neuen Lesegerätes ist geplant ergonomische Aspekte mit einzubeziehen. So soll eine Krücke, an der am Ende die Leseinheit befestigt ist und ein kompakter Computer (RPI4) mit einem verbautem Monitor der am Handgriff befestigt werden soll, das Auslesen der am Boden verbauten Sensoren vereinfacht werden.

Die Messungen an dem Versuchsträger Concerto werden fortgesetzt. Dabei werden Versuche zur Rissbildung durch Lastumlagerung vor allem mit dem Ultraschall-System überwacht. Die provozierte Korrosion wird mit allen Sensortechniken überwacht - Ergebnisse dazu sind aber erst 2026 zu erwarten.

zu 2.2.4 **AP4: Datenhaltung, Schnittstellen zu BIM und Digitaler Zwilling**

Um die nun abgespeicherten Messwerte an eine zentrale Datenbank schicken zu können wird ein künftiges Python Skript dafür sorgen, die abgespeicherten Messwerte für den Datentransport aufzuarbeiten, um sie zu verschicken.

Nach Absprache mit der Datenbank-Programmiererin der GRS wird in Betracht gezogen, die abgespeicherten Messwerte in einem Dateiordner der TU-Braunschweig abzulegen, welche künftig von dort zur Datenbank synchronisiert werden sollen. Um die in einer .csv Datei abgespeicherten Messwerte von dem Lesegerät, welches sich im lokalen Netz der TU-Braunschweig künftig befinden wird, zu dem Ordner der TU-Braunschweig zu senden wird ein weiteres Python-Skript noch automatisiert und beispielsweise einmal täglich ausführbar im Lesegerät eingerichtet.

Für die Ultraschall-Ergebnisse wird die Datenbank-Integration und Visualisierung noch abgestimmt.

zu 2.2.5 **Verwaltung, Sonstiges**

Nach Projektplan. Durch die erst spät mögliche Rekrutierung eines Mitarbeiters sind jedoch Verzögerungen eingetreten, die nur zum Teil wieder aufzuholen sind.

7 **Beziehung zu anderen Vorhaben**

-

8 **Berichte und Veröffentlichungen**

-

9 **Zugänglichkeit der Berichte**

-