

**KIT**  
**Karlsruher Institut für Technologie**  
**Die Forschungsuniversität in der**  
**Helmholtz-Gemeinschaft**

**PTE Nr. 60**

BMW geförderte FuE-Vorhaben zur  
„Entsorgung radioaktiver Abfälle“

Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2020

Projekträger Karlsruhe (PTKA)  
Entsorgung

**Mai 2021**

## PTE-Berichte

Der Projektträger Karlsruhe (PTKA) informiert mit Fortschrittsberichten über den aktuellen Stand der von ihm administrativ und fachlich betreuten FuE.

Die Fortschrittsberichtsreihen behandeln folgende Themenschwerpunkte:

- Entsorgung radioaktiver Abfälle  
(PTE Nr. x seit 1991, fortlaufend \*)
- Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen  
(PTE-S Nr. x seit 2001, fortlaufend #)
- Nukleare Sicherheitsforschung  
(PTE-N Nr. x seit 2010, fortlaufend)

Die Fortschrittsberichtsreihen sind online verfügbar:

[www.ptka.kit.edu/ptka-alt/wte/287.php](http://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/wte/287.php)

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren bzw. die entsprechenden Forschungsstellen. Das KIT übernimmt keine Gewähr insbesondere für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

*\* Bis Ende des Jahres 2011 wurde in dieser Fortschrittsberichtsreihe auch über die BMBF-geförderte FuE zur untertägigen Entsorgung chemotoxischer Abfälle informiert. Die FuE-Schwerpunkte „Untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle“ und „Sicherheitsforschung für Bergbauregionen“ wurden zum 31.12.2011 beendet.*

*# Bis Ende des Jahres 2016 wurde in dieser Fortschrittsberichtsreihe auch über die BMBF-geförderte FuE zu Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen informiert. Seit 1.10.2016 wird dieser Förderschwerpunkt durch den Projektträger GRS betreut.*

## Vorwort

Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) arbeitet das KIT seit 1991 als Projektträger auf dem Gebiet „Entsorgung“.

Im Rahmen dieses Auftrages betreut der Projektträger Karlsruhe fachlich und administrativ die vom BMWi im Rahmen des jeweilig gültigen Förderkonzepts geförderten FuE-Vorhaben. Seit Februar 2015 ist das Förderkonzept „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle – Förderkonzept des BMWi (2015-2018)“ Grundlage der Projektförderung.

Die FuE-Inhalte sind in folgende *sechs FuE-Bereiche* aufgeteilt innerhalb derer Projekte gefördert werden können:

- Bereich 1: Auswirkung verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter  
(Federführung PT GRS)
- Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl
- Bereich 3: Endlagerkonzepte und Endlagertechnik
- Bereich 4: Sicherheitsnachweis
- Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen
- Bereich 6: Kernmaterialüberwachung (Safeguards)

Der vorliegende Fortschrittsbericht dokumentiert Stand und Ergebnisse dieser FuE-Vorhaben. Er wird vom Projektträger *halbjährlich* herausgegeben, um kontinuierlich über die durchgeführten Arbeiten zu informieren.

Der Bericht ist wie folgt gegliedert:

Teil 1 listet die FuE-Vorhaben auf, die dem jeweiligen FuE-Bereich zugeordnet sind.

Teil 2, der Hauptteil, enthält die „formalisierten Zwischenberichte“ zu den FuE-Vorhaben, die nach dem Förderkennzeichen geordnet sind. Im Förderkennzeichen bedeuten die Buchstaben

- E ⇒ „Entsorgung radioaktiver Abfälle“ und
- W ⇒ „Kernmaterialüberwachung“.

Teil 3 listet die FuE-Vorhaben, zugeordnet nach der jeweiligen Forschungsstelle, auf.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Verzeichnis der Vorhaben gemäß FuE-Bereiche.....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Auswirkung verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter.</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl.....</i>	<i>3</i>
1.3	<i>Endlagerkonzepte und Endlagertechnik.....</i>	<i>5</i>
1.4	<i>Sicherheitsnachweis .....</i>	<i>9</i>
1.5	<i>Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen.....</i>	<i>13</i>
1.6	<i>Kernmaterialüberwachung.....</i>	<i>15</i>
<b>2</b>	<b>Formalisierte Zwischenberichte .....</b>	<b>17</b>
2.1	VORHABEN BEREICH 1 .....	17
2.2	VORHABEN BEREICH 2 bis 5 .....	45
2.3	VORHABEN BEREICH 6 .....	221
	Information zu Publikationen sowie zu Aus- und Weiterbildung.....	225
<b>3</b>	<b>Verzeichnis der Forschungsstellen .....</b>	<b>227</b>



# 1 Verzeichnis der Vorhaben gemäß FuE-Bereiche

## 1.1 Auswirkung verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter

<b>1501538A</b>	Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Analysemethoden zur Simulation der Schädigung und der induzierten Erschütterungen in Stahlbetonstrukturen infolge stoßartiger Belastungen (SimSEB) - Teilvorhaben: Verhalten von Stahlbetonstrukturen bei Stoßbelastungen unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung	<b>TU Kaiserslautern</b>	 18
<b>1501543B</b>	Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender kerntechnischer Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer — Teilvorhaben: Besondere Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Besonderheiten großer Stahlbetonquerschnitte sowie der zugehörigen Bestandsaufnahme	<b>TU Kaiserslautern</b>	 20
<b>1501560</b>	Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK)	<b>Leibniz Universität Hannover</b>	 22
<b>1501561</b>	Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK	<b>Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin</b>	 24
<b>1501576</b>	ProCast - Probabilistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen	<b>Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., München</b>	 26
<b>1501606A</b>	Verbundvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur nichtinvasiven Analyse des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Strahlungs-basierte Bildgebung	<b>TU Dresden</b>	 28
<b>1501606B</b>	Verbundvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur nichtinvasiven Analyse des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter bei verlängerter Zwischenlagerung - Teilvorhaben: Konzeption und Errichtung eines automatisierten Strahlungsmesssystems zur Durchführung von Experimenten und Zustandsanalyse von TLB	<b>Hochschule Zittau/Görlitz</b>	 30

<b>1501615</b>	Atomistische Untersuchung der Auswirkung von Strahlenschäden auf die Brennelementintegrität in der langfristigen Zwischenlagerung	<b>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen(RWTH)</b>	📖 34
<b>RS1553A</b>	Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung („ProbBau“)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 36
<b>RS1563</b>	Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 38
<b>RS1586A</b>	Spannungsinduzierte Wasserstoffumlagerung in Brennstabhüllrohren während längerfristiger Zwischenlagerung (SPIZWURZ) – Theoretische Beschreibung, Modellierung und Verifizierung	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 40
<b>RS1588</b>	Langzeitverhalten trocken zwischengelagerter Brennelemente während der verlängerten Zwischenlagerung	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 42

## 1.2 Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl

<b>02 E 11637A</b>	Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt A: 3D-Spannungsmodell und Aufskalierung	<b>TU Darmstadt</b>	 100
<b>02 E 11637B</b>	Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt B: Multiskalenansatz	<b>Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam</b>	 102
<b>02 E 11637C</b>	Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt C: Geomechanik von Sedimentbecken	<b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	 104
<b>02 E 11819</b>	Mineralumwandlung und Sorption bei erhöhten Temperaturen in geklüfteten Kristallingesteinen und Barrierematerial (MUSE)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	 168
<b>02 E 11829</b>	Tonsteinforschung im Felslabor Mont Terri ab Phase 25 (MonTe-25)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	 170



### 1.3 Endlagerkonzepte und Endlagertechnik

<b>02 E 11193A</b>	Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen	<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>	📖 46
<b>02 E 11193B</b>	Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 48
<b>02 E 11557</b>	Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GESAV II)	<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>	📖 78
<b>02 E 11577A</b>	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 82
<b>02 E 11617A</b>	Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt A	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 94
<b>02 E 11627</b>	Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 98
<b>02 E 11678</b>	Untersuchungen zur Vervollständigung von Stoffmodellen für Salz- oder Sorelbeton sowie spezieller low-ph und hochdichter bzw. hochfester Betone zum rechnerischen Nachweis der Rissbeschränkung für Bauwerke (UVERSTOFF)	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 118
<b>02 E 11688</b>	Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III)	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 120
<b>02 E 11698</b>	Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwirkungen auf zementbasierte Dichtelemente (THYMECZ)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 122
<b>02 E 11708A</b>	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 124

<b>02 E 11708B</b>	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 126
<b>02 E 11708C</b>	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C	<b>IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig</b>	📖 128
<b>02 E 11708D</b>	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 130
<b>02 E 11718A</b>	Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 132
<b>02 E 11718B</b>	Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B	<b>DMT GmbH &amp; Co. KG, Essen</b>	📖 134
<b>02 E 11728</b>	Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein (KOREKT)	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 136
<b>02 E 11748A</b>	Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt A	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 138
<b>02 E 11748B</b>	Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden</b>	📖 140
<b>02 E 11749</b>	Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (TREND)	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 142
<b>02 E 11769A</b>	Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A	<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>	📖 150
<b>02 E 11769B</b>	Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden</b>	📖 152
<b>02 E 11779</b>	MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz, Qualitätssicherung mit Ultraschall (MgO-S3)	<b>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin</b>	📖 154

- |                    |  |  |       |
|--------------------|--|--|-------|
| <b>02 E 11799A</b> | Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt A                 | <b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>                         | 📖 158 |
| <b>02 E 11799B</b> | Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt B                 | <b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b> | 📖 160 |
| <b>02 E 11799C</b> | Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt C                 | <b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>                      | 📖 162 |
| <b>02 E 11839</b>  | Entwicklung eines Leitfadens zur Auslegung und zum Nachweis von geotechnischen Barrieren für ein HAW Endlager in Salzformationen (RANGERS) | <b>BGE Technology GmbH, Peine</b>  | 📖 172 |



## 1.4 Sicherheitsnachweis

<b>02 E 11415D</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D	<b>Universität des Saarlandes, Saarbrücken</b>	📖 50
<b>02 E 11415F</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F	<b>Universität Potsdam</b>	📖 52
<b>02 E 11415H</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H	<b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg</b>	📖 54
<b>02 E 11446A</b>	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt A	<b>Dr. Andreas Hampel, Mainz</b>	📖 56
<b>02 E 11446B</b>	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B	<b>IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig</b>	📖 58
<b>02 E 11446C</b>	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt C	<b>Leibniz Universität Hannover</b>	📖 60
<b>02 E 11446D</b>	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D	<b>TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig</b>	📖 62
<b>02 E 11446E</b>	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 64
<b>02 E 11466</b>	Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 66
<b>02 E 11486A</b>	Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 68

02 E 11486B	Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 70
02 E 11567A	Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH <sup>2</sup> M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt A	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 80
02 E 11577B	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 84
02 E 11607A	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 86
02 E 11607B	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.</b>	📖 88
02 E 11607C	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	📖 90
02 E 11607D	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt D	<b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>	📖 92
02 E 11617B	Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt B	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 96
02 E 11647	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 106
02 E 11658A	Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 108
02 E 11658B	Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt B	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 110

02 E 11668A	Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	112
02 E 11668B	Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.</b>	114
02 E 11668C	Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	116
02 E 11759A	Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt A	<b>Friedrich-Schiller-Universität Jena</b>	144
02 E 11759B	Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt B	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	146
02 E 11759C	Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt C	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	148
02 E 11809A	Verbundprojekt: Weiterentwicklung von d <sup>3</sup> f <sup>++</sup> : Hydrogeologische Modellierung im regionalen Maßstab (HYMNE), Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	164
02 E 11809B	Verbundprojekt: Weiterentwicklung von d <sup>3</sup> f <sup>++</sup> : Hydrogeologische Modellierung im regionalen Maßstab (HYMNE), Teilprojekt B	<b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main</b>	166
02 E 11860A	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt A	<b>Johannes Gutenberg-Universität Mainz</b>	206
02 E 11860B	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.</b>	208
02 E 11860C	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt C	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	210
02 E 11860E	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt E	<b>TU München</b>	212

- 02 E 11860F** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt F **Universität Potsdam**  214
- 02 E 11860G** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt G **TU Dresden**  216
- 02 E 11860H** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt H **Universität Heidelberg**  218

## 1.5 Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen

<b>02 E 11547A</b>	Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt A	<b>Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V.</b>	📖 72
<b>02 E 11547B</b>	Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	📖 74
<b>02 E 11547C</b>	Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt C	<b>Freie Universität Berlin</b>	📖 76
<b>02 E 11789</b>	Wegemanagement bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland (WERA)	<b>Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V.</b>	📖 156
<b>02 E 11849A</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt A	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 174
<b>02 E 11849B</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt B	<b>Christian-Albrechts-Universität zu Kiel</b>	📖 176
<b>02 E 11849C</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt C	<b>Freie Universität Berlin</b>	📖 178
<b>02 E 11849D</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt D	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	📖 180
<b>02 E 11849E</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt E	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	📖 182
<b>02 E 11849F</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt F	<b>Leibniz Universität Hannover</b>	📖 184

<b>02 E 11849G</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt G	<b>Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V.</b>	📖 186
<b>02 E 11849H</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt H	<b>TU Berlin</b>	📖 188
<b>02 E 11849I</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt I	<b>TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig</b>	📖 190
<b>02 E 11849J</b>	Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt J	<b>Universität Kassel</b>	📖 192
<b>02 E 11850A</b>	Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt A	<b>Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ -, Leipzig</b>	📖 194
<b>02 E 11850B</b>	Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt B	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 196
<b>02 E 11850C</b>	Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt C	<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>	📖 198
<b>02 E 11850D</b>	Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt D	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 200
<b>02 E 11850E</b>	Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt E	<b>Friedrich-Schiller Universität Jena</b>	📖 202
<b>02 E 11850F</b>	Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt F	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	📖 204

## 1.6 Kernmaterialüberwachung

02 W 6279 Neu- und Weiterentwicklung von Konzepten, Methoden und Techniken für die internationale Kernmaterialüberwachung, insbesondere im Rahmen der nuklearen Entsorgung (SAFEGUARDS-3) **Forschungszentrum Jülich**  222



## **2 Formalisierte Zwischenberichte**

### **2.1 Vorhaben Bereich 1**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Hochschule Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Straße, 67663 Kaiserslautern		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501538A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Analysemethoden zur Simulation der Schädigung und der induzierten Erschütterungen in Stahlbetonstrukturen infolge stoßartiger Belastungen (SimSEB) - Teilvorhaben: Verhalten von Stahlbetonstrukturen bei Stoßbelastungen unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>  15.02.2017 bis 31.07.2020	<b>Berichtszeitraum:</b>  01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b>  453.586,79 EUR	<b>Projektleiter:</b>  Prof. Dr.-Ing. Sadegh-Azar	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel der geplanten Arbeiten ist die Weiterentwicklung und Erprobung von Analysemethoden zur Simulation der Schädigung und der induzierten Erschütterungen in Stahlbetonstrukturen infolge stoßartiger Belastungen. Dabei sollen zur Validierung der Analysemethoden die Ergebnisse zur Thematik kürzlich durchgeführten sowie noch geplanten Aufprallversuchen bei VTT in Finnland berücksichtigt werden. Die Erprobung der Methoden soll an der Struktur eines Zwischenlagers erfolgen. Das Projekt wird im Rahmen eines Verbundvorhabens mit der GRS durchgeführt. Die Arbeiten der GRS fokussieren sich auf das Reaktorgebäude inklusive einer Kühlkreislaufschleife.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Lokales Schädigungsverhalten von Stahlbeton unter stoßartiger Belastung (Untersuchungen zum Einfluss der Durchstanzbewehrung auf den Penetrationswiderstand (Tragfähigkeit) von Stahlbetonstrukturen)
- AP2: Ansätze im Zeitbereich und im Frequenzbereich zur Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung (Untersuchung und Umsetzung der Analysemethoden im Frequenzbereich)
- AP3: Verhalten von Stahlbetonstrukturen beim Aufprall von Turbinen
- AP4: Ganzheitliche nichtlineare dynamische Berechnung von Aufprallversuchen zu induzierten Erschütterungen
- AP5: Aufprallsimulationen auf reale Gebäudestrukturen unter Berücksichtigung induzierter Erschütterungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Zur Erweiterung und Verifizierung von Simulationsmodellen an Versuchen mit Durchstanzbewehrung wurden ausgewählte Versuche der UKAEA-Testreihe (verformbare Projektile) aufbereitet. Parallel zu den großskaligen Meppen-Versuchen (Meppen II) wurden an der Beschussanlage der britischen Atombehörde UKAEA, 28 kleinmaßstäbliche Aufprallversuche mit deformierbaren Projektilen durchgeführt. Es wurden hierzu 3D-Simulationsmodelle zu ausgewählten Versuchen in LS-DYNA erstellt. Die Auswertung und der Vergleich zwischen den experimentellen Daten und den Ergebnissen der numerischen Simulation in LS-DYNA, zeigen stimmige Ergebnisse, insbesondere hinsichtlich dem lokalen Schädigungsverhalten der Stahlbetonplatten (z. B. Rissbilder, Stanzkegelform). Bei der Auswertung des Verschiebungsverhaltens auf der Platten-

rückseite besonders im Bereich globaler Plattenschwingungen, wurde eine signifikante Überschätzung auf Seiten der numerischen Simulationen festgestellt. Grundlegend liefert das verwendete und in LS-DYNA implementierte RHT-Betonmodell allerdings zufriedenstellende Übereinstimmungen mit den experimentellen Daten und kann die relevanten Phänomene im Zusammenhang mit Biege- und Stanzbruch sowie die jeweiligen Schädigungszonen abbilden.

- AP2: Die anhand der Verifikation- und Validierungsuntersuchungen sowie Beispielberechnungen gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Erstellung des Zwischenlager-Modells für die Analyse von induzierten Erschütterungen infolge eines Turbinenanpralls eingesetzt.
- AP3: Das bereits entwickelte und vorliegende Modell vom Triebwerkstyp trent 500 wurde im Detaillierungsgrad erweitert. Weiterhin wurde ein Triebwerk vom Typ trent 900 mit hohem Detaillierungsgrad erstellt.
- AP4: Im Rahmen von Parameterstudien sowie Modellierungsanpassungen des Mockups konnten Abweichungen beim Nachschwingverhalten einzelner Sensorpunkte untersucht und nahezu behoben werden.
- AP5: Für eine ganzheitliche und gekoppelte Untersuchung des Lastfalls Turbinenaufprall auf ein Zwischenlager wurde ein generisches Modell des Zwischenlagertyps WTI erstellt und mit verschiedenen Triebwerkstypen belastet. Aufgrund der Komplexität und des hohen Rechenaufwands wurde eine Kombination aus 3D-Volumenelementen (Solids) und Schalenelementen angewandt. Der Anprallbereich der Zwischenlageroberfläche wurde diskret modelliert, um die lokalen plastischen Effekte abzubilden. Dieser Bereich (Stahlbetonwand) wird durch 3D-Volumenelemente und die Bewehrung durch darin eingebettete Stabelemente repräsentiert. Außerhalb dieses Bereiches wird mit Schalenelementen die restliche Gebäudehülle modelliert. Um die Volumenelemente des diskretisierten Bereichs mit den Schalenelementen der Außenhülle zu verbinden, wird eine mit den äußeren Knoten des diskreten 3D-Bereichs, fest verbundene "Hilfshell" erstellt. Dieser Ansatz wurde mithilfe statischer sowie dynamischer Modellversuche (3-Punkt-Biegeplatte und Impakttest mit einfachen Geometrien) verifiziert, so dass eine exakte Übertragung des Verschiebungsverhaltens zwischen diskretem Bereich und Außenhülle möglich ist. Zusätzlich wurden Gebäudeeigenfrequenzen und Massenbeteiligungen berechnet und auf Plausibilität geprüft.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP1: Aktuell noch untersuchte und simulierte Versuche versch. Testreihen (Meppen, UKAEA, VTT IMPACT I-III, TUD) sollen vollständig ausgewertet und für den Abschlussbericht aufbereitet werden. Auch die Ergebnisse vergangener im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführter Simulationen und Auswertungen werden aufbereitet und die Erkenntnisse zusammengeführt.
- AP2: Aktuell findet die PML-Methode und somit die Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung bei Anprallberechnungen eines Zwischenlagers Anwendung. Der Einfluss der Interaktion soll abschließend quantifiziert werden. Danach erfolgt die Zusammenstellung der gesamten Arbeit im Rahmen der Anfertigung des Abschlussberichts.
- AP3: Die bereits gewonnenen sowie noch ausstehenden Aufpralltests der detaillierten Triebwerksmodelle sollen aufbereitet, zusammengeführt und für den ausstehenden Abschlussbericht bewertet werden.
- AP4: Die im Laufe des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse und im Rahmen der Teilnahme am IRIS-3 Projekt angefertigten Berichte und Auswertungen, werden aufbereitet und im Abschlussbericht zusammengeführt.
- AP5: In einem letzten Schritt werden die Simulationsergebnisse im lokalen sowie globalen Bereich ausgewertet. Dazu sollen die induzierten Erschütterungen analysiert und insbesondere der Einfluss der Boden-Bauwerk-Interaktion bewertet werden.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

In diesem Berichtszeitraum wurden keine Publikationen veröffentlicht.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str. 1, 67663 Kaiserslautern		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501543B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender kerntechnischer Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer — Teilvorhaben: Besondere Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Besonderheiten großer Stahlbetonquerschnitte sowie der zugehörigen Bestandsaufnahme(ProbBau)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2017 bis 31.12.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 242.580,20 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Glock	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens besteht darin, vorhandene Methoden und Werkzeuge für probabilistische Bauwerksanalysen von Langzeitzwischenlagern weiterzuentwickeln und zu vervollständigen. Hierbei soll das Langzeitverhalten der Lagergebäude besondere Berücksichtigung finden, um Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit besser zu bewerten und ggf. durch geeignete Maßnahmen sicherstellen zu können. Die Arbeiten an der TU Kaiserslautern fokussieren sich dabei auf Besonderheiten großer Bauteilquerschnitte.

Bei dem Vorhaben handelt es sich um ein Teilvorhaben des Verbundes „ProbBau“. Verbundpartner ist die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (FKZ: RS1553A).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Darstellung der Grundlagen für die zuverlässigkeitsorientierte Bewertung und Nachrechnung kerntechnischer Bauwerke
- AP2: Möglichkeiten der Anpassung des Zielzuverlässigkeitsindex für die Nachrechnung bestehender Bauwerke
- AP4: Erstellung einer qualifizierten Bestandsaufnahme als Grundlage für die Nachrechnung und Besonderheiten großer Querschnitte
- AP5: Verwendung von Monitoring-Maßnahmen
- AP6: Methodik zur Entwicklung der vorhandenen Zuverlässigkeit der bestehenden kerntechnischen Bauwerke
- AP7: Entwicklung einer Methodik für die zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnungen kerntechnischer Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer

Das AP3 des Verbundarbeitsplans wird ausschließlich durch den Verbundpartner bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP4: Eine weitere Versuchsreihe mit vertikal geschichteten Probekörpern wurde durchgeführt. Durch den Einsatz von photogrammetrischen Messmethoden konnte neben der Betondruckfestigkeit auch die Dehnung des geschichteten Probekörpers sowie das Rissbild bzw. Rissentwicklung betrachtet werden, was zusätzliche Vergleichsmöglichkeiten mit den Referenzprobekörpern schafft. Die durchgeführten Versuche werden derzeit unter Verwendung eines geeigneten theoretischen Modells nachgerechnet, mit dem der durch Querdehnungsbehinderung verursachte zweiaxiale Spannungszustand berücksichtigt werden kann.
- Darüber hinaus wurde eine erste Versuchsreihe mit horizontal geschichtetem Betonfestigkeiten durchgeführt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die geschichteten Betonkörper versagen, wenn die maximal aufnehmbare Last des Betons mit der niedrigsten Festigkeit erreicht wird. Umlagerungseffekte wie bei den vertikal geschichteten Proben wurden nicht erwartet. Das Versagen trat jedoch erst oberhalb des erwarteten Wertes auf. Daher wurde mit einer detaillierten Analyse der geprüften Probekörper begonnen.
- AP5: Ein allgemeines Vorgehen wurde dokumentiert, mit dem sich die zusätzlichen Informationen aus Monitoring-Maßnahmen in der Bauwerksbewertung berücksichtigen lassen. Das Verfahren basiert auf der Methode des Bayes'schen Updating.
- Zudem wurden die im letzten Halbjahr recherchierten Methoden aufgearbeitet, wobei der Fokus auf Verfahren der Schwellwertüberwachung lag. Die Arbeiten befassten sich vor allem mit den Herausforderungen und der Anwendbarkeit des Monitorings an kerntechnischen Bauwerken. Daneben wurden relevanten Dokumente und Regelwerke mit Bezug zur Untersuchung kerntechnischer Bauwerke durchgearbeitet und das Ergebnis dokumentiert.
- AP6: Mit der Erstellung eines ersten Zwischenfazits im Sinne eines Leitfadens wurde begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Erarbeitung von Hinweisen für die Beprobung von massigen Bauteilen auf Basis der Vorhabenergebnisse sowie von Vorschlägen für mögliche Anpassungen bei der Bestimmung deren In-situ-Betondruckfestigkeit unter Berücksichtigung von Spannungsumlagerungen.
- AP6: Erarbeitung der übrigen Zwischenfazits.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>1501560</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2017 bis 31.08.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 206.081,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr.-Ing. Maier	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Bei Brennelementen stellt das Zirkonium-Hüllrohr die innere Barriere gegen Nuklidfreisetzung dar. Neben dem Langzeitverhalten des Behälters ist das der Hüllrohre für die Verlängerung der Zwischenlagerphase bis zur Endlagerung von Interesse. Wichtig für die Stabilität sind die Entstehung und Verteilung von Zirkoniumhydriden in der Zirkonium-Matrix.

Ziel des Vorhabens ist es, Modellvorstellungen zu entwickeln, wie die langfristige Entwicklung der Materialeigenschaften verläuft. Durch Modelleexperimente und Modellierungsansätze sollen die Schädigungsvorgänge im Material dargestellt werden. Die langfristigen Schädigungen der Zirkoniumhydrid-Bildung und -umverteilung stehen dabei im Fokus der Arbeiten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Definition der Randbedingungen

AP2: Materialwissenschaftliche Basisuntersuchungen an Zirkonium-Basislegierungen

AP3: Modelleexperimente zur Simulation der Materialentwicklung

AP4: Modellierungsansätze zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Zirkonium-Materials

AP5: Beschreibung und Untersuchung des Spannungszustandes im Zr-Material

AP6: Verifikation Experiment-Simulation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Literaturrecherche wird begleitend zu den Arbeiten im Vorhaben weitergeführt.
- AP2: Die Beladung der Proben für die Belastungssimulationen wurde initiiert. Ähnlich wie im ersten Halbjahr zeigten sich bei den gewählten Beladungsparametern (Druck: 18,5 bar, Dauer: 250h) bei einem Großteil der Proben ein starker Wasserstoffeintrag sowie ausgeprägte Veränderungen bzw. Schädigungen vor allem am Rand der Proben, wobei die Wasserstoff-Zielbeladung von 100 wppm um ein Vielfaches überschritten wurde. Die Konzentration der Schädigung auf die Randbereiche ist wahrscheinlich damit zu erklären, dass der Wasserstoff schneller aufgenommen wurde, als er durch Diffusion aus den Randbereichen in das Innere der Proben abfließen konnte. Höhere Probenmassen als in den Vorversuchen verhinderten dabei die vollständige Zerstörung der Proben. Verzinkungen der Haltegestelle konnte als Grund für die hohe Wasserstoffaufnahme ausgeschlossen werden. Inwieweit hoher Beladendruck und -temperatur hierfür ursächlich sind, konnte auch in zusätzlichen Versuchen nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Daher wurden die Drücke für die Beladung weiterer Proben stark reduziert.
- An bereits untersuchten beladenen Proben aus den Vorversuchen wurden weitere XRD-Messungen an einem Querschliff zur detaillierteren Identifizierung der entstandenen Hydride durchgeführt. Es konnten jedoch nur  $\gamma$ - und  $\epsilon$ -Hydride, nicht die für langsame Abkühlraten eigentlich typischen  $\delta$ -Hydride nachgewiesen werden. Insbesondere  $\gamma$ -Hydride gelten als metastabil und sind eher typisch für schnelle Abkühlraten.
- Die Untersuchungen zur röntgenographischen Darstellung der Hydride wurde auf die Proben mit extrem hohen Wasserstoffgehalten ausgeweitet. Die Randbereiche mit hoher Hydrierung konnten mit den verwendeten Feinfokus- und XRM-Verfahren aufgelöst werden. Einzelne Hydride ließen sich jedoch nicht auflösen.
- AP3: Die Belastung in den Modellexperimenten soll pneumatisch aufgebracht werden, wobei Argon als Druckmedium verwendet werden soll, da flüssige Druckmedien aufgrund der Versuchstemperaturen ausscheiden. Zusätzlich wird der Versuchsaufbau um eine Schutzhaube erweitert, um den Ofen bei Rohrversagen zu schützen und die Betriebssicherheit zu erhöhen. Die für den Versuchsaufbau konstruierte Druckleiste für die Druckmessungen verfügt jetzt ebenfalls über einen Hochtemperatur-Drucksensor. Zur Verhinderung zu hoher Temperaturgradienten sollen die Proben im Versuch mit Thermo-Fließ umwickelt werden. Für die Erfassung der Messdaten und die Versuchssteuerung wurde eine Regeleinrichtung konzipiert. Für diese können verschiedene Temperaturober als Messstelle dienen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Fortführung der Literaturrecherche
- AP2: Versuche zur elektrochemischen Wasserstoffbeladung, Untersuchung weiterer beladener Proben und weitere Versuche zur Darstellung von Hydridplatten mittels XRD
- AP3: Testen der entwickelten Druckleisten sowie Aufbau von Schutzhaube und Regelungseinrichtung für den Versuchsstand, Durchführung der Belastungsversuche
- AP5: Etablierung und Testen eines Präparationsverfahrens für die Spannungsmessungen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bongartz et al.: „Investigations of temporal rearrangement behavior of zirconium hydride precipitates in interim and final storage“; Kerntechnik 85, 2020 (6), 433-439; DOI: 10.3139/124.200070

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 12200 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501561</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2018 bis 31.10.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 254.513,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. Zencker	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Bislang wird bei der atomrechtlich genehmigten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente von der uneingeschränkten Intaktheit der Brennstäbe und Brennstabhüllrohre ausgegangen. Im Hinblick auf zukünftig deutlich verlängerte Zwischenlagerzeiten sind diesbezüglich zusätzliche belastbare Nachweise erforderlich. Zahlreiche internationale Untersuchungen an Brennstabhüllrohrmaterialien zeigen, dass unter den thermomechanischen Bedingungen der Behälterbeladung und -zwischenlagerung Veränderungen im Gefüge der Hüllrohrwerkstoffe auftreten können, die mit einer potenziell deutlich erhöhten Sprödbuchanfälligkeit einhergehen. Das Gesamtziel des Vorhabens besteht daher in der Entwicklung von Methoden zur Identifizierung des Risikos für sprödes Versagen von Brennstabhüllrohren und in der Ermittlung der Grenzbedingungen, unter denen sprödes Versagen ausgeschlossen werden kann.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik
- AP2: Entwicklung eines bruchmechanischen numerischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohrabschnitten im Ring Compression Test (RCT)
- AP3: Entwicklung eines bruchmechanischen Versagenskriteriums für Brennstabhüllrohre
- AP4: Validierung der entwickelten numerischen Modelle mittels experimenteller Untersuchungsergebnisse
- AP5: Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Das Iterationsverfahren zur Erstellung des elastisch-plastischen Materialmodells für den bruchmechanischen Bewertungsansatz wurde in Bezug auf physikalische Plausibilität und den benötigten Berechnungsaufwand weiter optimiert. Die Verbesserungen erleichtern die Anwendung des Verfahrens auf neue Datensätze.
- AP3: Die Entwicklung eines bruchmechanischen Versagenskriteriums wurde fortgesetzt. Die Auswertung der umfangreichen Parameterstudien zu den Kohäsivparametern erlaubt nun deren eindeutige Festlegung für einen konkreten Versagensfall im Experiment. Der Beginn des Versagensprozesses wird dabei durch die Kohäsivfestigkeit bestimmt. Durch die Wahl der korrekten Bruchenergie der Kohäsivzone stellt sich die Höhe des Kraftabfalls auf der Kraft-Verschiebungs-Kurve entsprechend der im Experiment aufgetretenen Risslänge ein. Auch sekundäre und tertiäre Risse im Ring Compression Test können modelliert und in die Bestimmung der Kohäsivparameter einbezogen werden. Weiterhin wurde der Einfluss mehrerer nahe beieinanderliegender Kohäsivzonen modelliert, um den gegenseitigen Einfluss benachbarter Hydridstrukturen abschätzen zu können.
- AP4: Die Validierung der numerischen Methoden wurde begonnen. Dafür wurden zunächst Materialmodelle auf Basis von Versuchsergebnissen erstellt, die nicht in die Entwicklung der Berechnungsmethode eingeflossen sind.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3: Abschluss der Entwicklungsarbeiten am bruchmechanischen Versagenskriterium mit Fokus auf den gegenseitigen Einfluss mehrerer Hydride und die Rissausbreitung.
- AP4: Validierung der im Vorhaben entwickelten Methoden und des Versagenskriteriums anhand von Versuchsergebnissen aus der Literatur und von Forschungspartnern.
- AP5: Erstellung des Abschlussberichtes.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

J. Ruiz-Hervias et al.; Failure mechanisms in unirradiated ZIRLO® cladding with radial hydrides, Journal of Nuclear Materials, Volume 544, 2021, 152668, ISSN 0022-3115, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152668>

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27c, 80686 München		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501576</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> ProCast - Probabilistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 15.10.2018 bis 14.10.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 806.546,89 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. Hohe	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Vorhabens ist die Entwicklung und Validierung eines probabilistischen Bewertungskonzepts für Bauteile aus Gusseisen, das in der Lage ist, auf Basis der stochastischen Eigenschaften der Mikrostruktur des Werkstoffs die Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen in Abhängigkeit der Mikrostruktur, der Umgebungstemperatur und den Belastungsszenarien zuverlässig rechnerisch vorherzusagen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Werkstoffversuche:

Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Festigkeitswerte des Werkstoffs (GJS-400), zur Quantifizierung des Versagensverhaltens, zur Charakterisierung der Mikrostruktur sowie zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung.

AP2: Mikrostruktursimulation:

Simulation des Versagensverhaltens des Werkstoffs auf der Mikrostrukturebene und des ferritischen Matrixwerkstoffs im spröd-duktilen Übergangsbereich sowie Beschreibung der Interaktion der Rissausbreitung mit den Graphiteinschlüssen.

AP3: Bruchmechanisches, probabilistisches Versagenskonzept:

Herleitung eines kombinierten Versagenskriteriums für duktilen und spröden Versagen.

AP4: Kontinuumsmechanische Versagensmodellierung:

Formulierung des makroskopischen Versagenskriteriums durch kontinuumsmechanische Feldgrößen (Spannung, Dehnung).

AP5: Ableiten eines probabilistischen Bewertungskonzepts:

Statistische Beschreibung aller Eingangsgrößen und Implementierung der Berechnungsschritte und Algorithmen in ein Bewertungsprogramm; Validierung des Bewertungswerkzeugs anhand einer Analyse von Fallbeispielen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Ermüdungsrisseinbringung bei den SE(B)-Proben wurde vorangetrieben. REM-Untersuchungen der Bruchflächen ergaben, dass der Spaltbruchanteil mit Abnahme der Prüftemperatur und Zunahme der Belastungsrate ansteigt. Metallografische Schliffbilder zeigten, dass die Perlitphase bei RT und -40 °C, die ferritische Matrix hingegen nur bei -40 °C spröde versagt. Mit den Unterbrechungsversuchen (low-blow) bei RT wurde begonnen.
- AP2: Die für die dritte Raumrichtung erweiterte Mikrostrukturgenerierung wurde mit realen Mikrostrukturen abgeglichen. Durch die Vergleiche konnte diese weiter optimiert werden. Einschlussüberschneidungen konnten mittels Wiederholung der Einschlusspositionierung innerhalb des Kontrollvolumens am realistischsten abgebildet werden.
- AP4: Die Fortführung der Auswertung von Versuchen insbesondere an SE(B)-Proben zeigte eine starke Abhängigkeit der Versagensgrenzkurven von der Entnahmeposition der Proben und den Dehnraten im Versuch. Daher mussten die Korrelationen zwischen den charakteristischen Dehnungen und dem verwendeten Versagenskriterium erneut angepasst werden.
- AP5: Die analytischen Lösungen für die Ersatzrissmodelle an kugelförmigen Poren wurden um den T-Stress ergänzt. Des Weiteren wurden FE-Analysen von Spannungszuständen an Poren unter unterschiedlicher Spannungsmehrachsigkeit durchgeführt. Die entsprechenden Spannungsverteilungen wurden geordnet nach Spannungsmehrachsigkeit in Form von Nachschlagetabellen aufbereitet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Durchführung von 3-Punkt-Biegeversuchen v. a. mit der Prüftemperatur 0 °C und schneller Beanspruchungsrate sowie Weiterführung von SE(B)-Probenvorbereitung und Unterbrechungsversuchen.
- AP2: Bestimmung mechanischer Werkstoffkennwerte der Graphiteinschlüsse sowie des Versagensverhaltens der Einschlüsse sowie der Grenzflächen und des Gesamtverbundes von Einschlüssen und Werkstoffmatrix.
- AP3: Bereitstellung einer verbesserten analytischen Beschreibung der Risswiderstandskurven bei verschiedenen Dehnraten, Temperaturen und Probenlagen im Behälter.
- AP4: Abschluss der numerischen Simulationen und Auswertungen von gekerbten Proben und Ableitung einer vollständigen probabilistischen Beschreibung der Versagensgrenzkurven für den Versuchswerkstoff.
- AP5: Erweiterung des bruchmechanisch basierten Modells in der Software IWM VERB.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>1501606A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur nichtinvasiven Analyse des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Strahlungsbasierte Bildgebung		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2020 bis 31.03.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 522.104,97 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hampel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im abgeschlossenen Vorhaben DCS-MONITOR (FKZ 1501518A-B) wurden Machbarkeitsstudien zur nichtinvasiven Überwachung des Behälterinhalts durchgeführt. Die Analysen zeigten, dass das Photonen- und Neutronenfeld um den Behälter sowie die Myonenbildung für ein Monitoring des Behälterinventars prinzipiell geeignet sind. Auf Basis dieser Ergebnisse ist es das Ziel dieses Vorhabens, die Ansätze der strahlungsfeldbasierten Diagnostik mit Gammastrahlung ( $\gamma$ ), Neutronen ( $n$ ) und Myonen ( $\mu$ ) vertieft zu untersuchen und in Richtung eines einsetzbaren Monitoringverfahrens speziell für CASTOR-Behälter zu qualifizieren. Dies schließt erstmals Feldstudien an realen Behältern und im Zwischenlager ein.

Bei dem Vorhaben handelt es sich um ein Teilvorhaben des Verbundes „DCS-Monitor II“. Verbundpartner ist die Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG). Das Teilvorhaben (FKZ 1501606B) der HSZG befasst sich mit der Konzeption und Errichtung eines automatisierten Strahlungsmesssystems zur Durchführung von Experimenten und Zustandsanalysen von TLB mit Fokus auf die Messung des  $\gamma$ - und  $n$ -Strahlungsfeldes.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Analyse von Forschungsergebnissen zum Verhalten des Behälterinventars
- AP2: Methodische Arbeiten zur Analyse von  $\gamma$ -,  $n$ - und  $\mu$ -Strahlungsfeldern
- AP3: Vorbereitung von Experimenten
- AP4: Experimentelle Studien an CASTOR-Behältern

Das AP1 wird dabei ausschließlich vom Verbundpartner HSZG bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Der Code G4beamline wurde anhand von Messdaten aus der Literatur erfolgreich für kosmische Myonen validiert. Im Anschluss wurden Skripte für die Simulation von Myonenmessungen an einfachen Objekten mit anschließender Datenanalyse erstellt. Letztere dient der Analyse von Abbildungseigenschaften von verschiedenen Detektordesigns bei unterschiedlichen Messzeiten. Als Teil der Datenanalyse wurde der PoCA-Algorithmus implementiert, der eine einfache Volumenrekonstruktion des untersuchten Objekts erlaubt. Im Anschluss wurde die Untersuchung eines 3 x 3-Brennstabündels simuliert. Die Simulationen zeigten, dass mit einem idealen Detektor das Brennstabündel bei ausreichend langer Messzeit deutlich aufgelöst werden kann. Mit einem realen Detektor kann das Bündel trotz erhöhter Unschärfe ebenfalls aufgelöst werden. Diese Unschärfe kann aber nicht vollständig durch noch längere Messzeiten verringert werden.
- AP3: In Zusammenarbeit mit dem FZ Jülich erfolgte die Inbetriebnahme vorhandener Straw-Tube-Tracker-Module. Im Zuge dessen wurden die Röhren einzeln in Betrieb genommen und mithilfe der Untergrundstrahlung sowie künstlicher radioaktiver Quellen charakterisiert. Mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Verstärker-Elektronik entwickelt, welche die simultane Auswertung von bis zu 8 Röhren ermöglicht. Im Anschluss wurden Messungen mit bis zu 8 horizontal übereinander liegenden Röhren bei natürlichem Strahlungshintergrund durchgeführt. Dabei wurden durch eine ausreichend hohe Datenschreibrate sowie durch nachträgliche Analysen mittels Softwareskript die Aufzeichnung aller Ereignisse der Zählrohre sowie die Ermittlung zeitgleicher Ereignisse in allen Kanälen (Koinzidenzmessung) gewährleistet. Die in den Messungen ermittelten Myonenzählraten stimmten mit den Erwartungen überein, erlaubten aber noch keine Bildgebung. Die Detektion der Myonen erfolgte dabei ausschließlich über die Koinzidenzmessung. Deren Detektion anhand gemessener Impulshöhe oder -form war in diesen Messungen nicht möglich. Aktuell wird auf Basis der bisher verwendeten Elektronik ein einheitliches und skalierbares Platinendesign mit Verstärkerschaltungen und digitaler Auswertung entworfen, welches zu einer Bildgebung mittels Myonen fähig sein soll. Parallel dazu erfolgten Planungen zur Entwicklung eines eigenen Detektordesigns, wofür der Einsatz von Driftkammern favorisiert wird. Driftkammern ermöglichen theoretisch eine räumliche Auflösung von 1 mm und bieten gegenüber Straw-Tube-Modulen Vorteile in Bezug auf Modularität, Robustheit, Bauweise sowie die Anzahl der benötigten Kanäle.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Bestimmung des Auflösungsvermögens für weitere Objektstrukturen und Detektordesigns, Implementierung eines MLEM-basierten Rekonstruktionsalgorithmus und Untersuchung der Entfaltung der Streufunktionen aus den radiographischen Messdaten.
- AP3: Fertigstellung und Inbetriebnahme der Detektorelektronik an den Straw-Tube-Modulen sowie Finalisierung der Konzeption und Aufbau des eigenentwickelten Detektordesigns.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501606B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur nichtinvasiven Analyse des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter bei verlängerter Zwischenlagerung - Teilvorhaben: Konzeption und Errichtung eines automatisierten Strahlungsmesssystems zur Durchführung von Experimenten und Zustandsanalyse von TLB		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>  01.04.2020 bis 31.03.2022	<b>Berichtszeitraum:</b>  01.04.2020 bis 30.06.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b>  567.203,86 EUR	<b>Projektleiter:</b>  Prof. Dr. Kratzsch	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im abgeschlossenen Vorhaben DCS-MONITOR (FKZ 1501518A-B) wurden Machbarkeitsstudien zur nichtinvasiven Überwachung des Behälterinhalts durchgeführt. Die Analysen zeigten, dass das Photonen- und Neutronenfeld um den Behälter sowie die Myonenbildung für ein Monitoring des Behälterinventars prinzipiell geeignet sind. Auf Basis dieser Ergebnisse ist es das Ziel dieses Vorhabens, die Ansätze der strahlungsfeldbasierten Diagnostik mit Gammastrahlung ( $\gamma$ ), Neutronen ( $n$ ) und Myonen ( $\mu$ ) vertieft zu untersuchen und in Richtung eines einsetzbaren Monitoringverfahrens speziell für CASTOR-Behälter zu qualifizieren. Dies schließt erstmals Feldstudien an realen Behältern und im Zwischenlager ein.

Bei dem Vorhaben handelt es sich um ein Teilvorhaben des Verbundes „DCS-Monitor II“. Verbundpartner ist die Technische Universität Dresden (TUD). Das Teilvorhaben (FKZ 1501606A) der TUD fokussiert sich auf weiterführende Analyse und Erprobung der Myonenbildung.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Analyse von Forschungsergebnissen zum Verhalten des Behälterinventars
- AP2: Methodische Arbeiten zur Analyse von  $\gamma$ -,  $n$ - und  $\mu$ -Strahlungsfeldern
- AP3: Vorbereitung von Experimenten
- AP4: Experimentelle Studien an CASTOR-Behältern

Das AP1 wird dabei ausschließlich von der HSZG bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Rechercheergebnisse wurden in einem technischen Bericht dokumentiert. Der Bericht enthält allgemeine Informationen zu BE, CASTOR-Behältern und Zwischenlagerkonzepten. Der Fokus des Berichtes liegt auf Schädigungsarten und -mechanismen von Brennstäben. Neben der international umfassend beforschten Thematik der Wasserstoffversprödung wurde im Rahmen der Recherche als weiterer relevanter Schädigungsmechanismus eine fortgeschrittene Ermüdung des Hüllrohrwerkstoffs durch häufige Lastwechsel im Kernkraftwerksbetrieb identifiziert. Ferner befasste sich die Recherche mit verfahrens- und messtechnischen Methoden zur Schadensanalyse.
- AP2: Verfügbare Simulations- und Experimentaldaten zum n- und  $\gamma$ -Strahlungsfeld von CASTOR-Behältern wurden zusammengetragen und kategorisiert. Die Daten variieren stark und erscheinen teils sogar widersprüchlich, was sich darauf zurückführen lässt, dass in den verschiedenen Untersuchungen nie alle Einflussfaktoren (u. a. Beladungszustand Behälter, Bestrahlungshistorie BE) in die Berechnungen eingeflossen sind. Es lässt sich festhalten, dass jeder Behälter eine eigene Strahlungssignatur aufweist, welche gemeinsam mit der jeweiligen technischen Dokumentation ausgewertet werden muss. Ferner wurde festgestellt, dass die Intensität der Gammastrahlung während der Zwischenlagerung schneller abnimmt als die der Neutronenstrahlung. Die Messung Letzterer könnte sich somit nach längeren Standzeiten als aussagefähiger erweisen. Ferner hat der Abstand der Sensoren von Behälterwand einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse.
- AP3: Aktuell verfügbare  $\gamma$ - und n-Detektoren wurden in Bezug auf ihre Tauglichkeit für das geplante teilautomatisierte Detektorsystem analysiert. Als besonders vielversprechend wurden Detektoren identifiziert, die mit CLYC-Szintillationskristallen arbeiten. Des Weiteren wurden die Randbedingungen für die Messungsdurchführung an CASTOR-Behältern mit der BGZ erörtert. Bspw. muss ein beschädigungsfreier Umgang mit dem Behälter gewährleistet werden. Für die Messungen im Zwischenlager wurde unter Berücksichtigung der mit der BGZ besprochenen Randbedingungen ein modulares vertikales Positionierungssystem für die Sensorik entworfen. Die Konstruktion beinhaltet einen Kippschutz und es wurde auf maximale Steifigkeit zur Verhinderung von Pendelbewegungen geachtet. Das orbitale Verfahren der Konstruktion soll in einem festen Radius um den CASTOR erfolgen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Fortführung der Analyse von Forschungsergebnissen
- AP2: Simulationen des  $\gamma$ - und n-Strahlungsfeldes von CASTOR-Behältern unter Zuhilfenahme von Simulations- und Experimentaldaten der BGZ
- AP3: Entscheidung für Detektortyp und Vorbereitung einer entsprechenden Ausschreibung; Entwicklung eines Baugruppenträgers für die Detektoren

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

S. Reinicke et al.: An analysis for detecting potential relocation of the inventory of dry storage containers during prolonged interim storage via changes in the wall temperature fields; Journal on Elsevier, Dresden 2020

S. Reinicke: Möglichkeiten der nicht-invasiven Überwachung von TLB: Übersicht zu den Verbundprojekten ,DCS-Monitor I+II; Der Prozess der Endlagersuche in Deutschland – Experttalk, Zittau, 23.10.2020

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501609B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Spannungsinduzierte Wasserstoffumlagerung in Brennstabhüllrohren während längerfristiger Zwischenlagerung - Experimente zur Bestimmung der Eigenspannungen sowie der Wasserstofflöslichkeit und -diffusion		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 15.06.2020 bis 14.06.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 15.06.2020 bis 30.06.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 449.216,37 EUR	<b>Projektleiter:</b> Große	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel besteht in der experimentellen Bestimmung der Löslichkeit und Diffusion von Wasserstoff in Hüllrohrmaterialien unter mechanischer Spannung. Daraus lässt sich der Fluss sowie das chemische Potential des Wasserstoffs in Hüllrohrmaterialien unter Bedingungen der längerfristigen Zwischenlagerung ausgedienter Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern (TLB) bestimmen. Das Vorhaben verfolgt die Anwendung von verschiedenen Einzeleffekttests, deren zusammengeführte Ergebnisse allgemeine Anwendbarkeit ermöglichen sollen. In einem ca. achtmonatigen Großversuch sollen in einem Brennstab-Simulationsbündel prototypische Veränderungen in der Hydrid-Struktur erzeugt und danach analysiert werden.

Das Vorhaben ist ein Teilvorhaben des Verbundes SPIZWURZ. Der Schwerpunkt des Teilvorhabens am KIT liegt auf der experimentellen Ermittlung der Einflüsse auf den Wasserstofffluss im Hüllrohrmaterial. Im Teilvorhaben (RS1586A) des Verbundpartners Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS) steht die theoretische Beschreibung der untersuchten Effekte sowie deren Verifizierung im Rahmen eines Blind-Benchmark im Vordergrund.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Wasserstoffdiffusion im Hüllrohr

AP2: Spannungszustände zwischen Kernbrennstoff und Zircaloy-Hüllrohr von bestrahlten Brennstoffproben

AP3: Zusammenführung und Auswertung

Der Verbundarbeitsplan umfasst insgesamt fünf Arbeitspakete. AP4 und AP5 werden ausschließlich durch den Verbundpartner GRS bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Ein Ofeninlett zur Wasserstoffbeladung von Kleinproben unter Unterdruck wurde konzipiert, gebaut und in Betrieb genommen. Erste Proben mit prototypischen Hydriden, die in Umfangsrichtung orientiert sind, wurden hergestellt. Die Konzipierung des Simulationsbündels für den Großversuch wurde abgeschlossen und die benötigten Komponenten wurden bestellt. Ebenso wurde mit der Beschaffung des Ofens für die Vorhydrierung der 2,50 Meter langen Hüllrohre sowie des entsprechenden Zubehörs begonnen. Die Kriechempfindlichkeit des Hüllrohrmaterials unter den geplanten Versuchsbedingungen wurde modelliert. Auf Basis der Ergebnisse wurde die maximale Anfangstemperatur für die Versuche auf 400 °C und die Abkühlgeschwindigkeit auf 0,5K/d festgelegt. Ferner wurde ein neuer Antrag für Neutronenradiographie-Experimente am PSI zur Untersuchung der Texturabhängigkeit der Wasserstoffdiffusion in Zircaloy erarbeitet und eingereicht.
- AP2: Es erfolgte die Inbetriebnahme sowie kalte Tests eines geeigneten Mikrometers zur Vermessung des Hüllrohrdurchmessers vor und nach Herauslösen des Brennstoffs. Erste Tests eines experimentellen Aufbaus zum Herauslösen des Brennstoffes in der abgeschirmten Boxenlinie des KIT-INE wurden durchgeführt. Ferner wurden die zu erwartende Änderung des Hüllrohrradius durch Herauslösen des Brennstoffs seitens KIT und GRS abgeschätzt und die Ergebnisse verglichen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Prozedur der Wasserstoffbeladung soll optimiert und ein Kleinprobensatz für die Neutronenradiographie-Experimente hergestellt werden. In Vorversuchen zum Kristallitwachstum in Zircaloy-Hüllrohren soll eine Methode zur Einstellung einer definierten Korngröße entwickelt werden. Ferner soll die Vorhydrierung der Hüllrohre für den Bündelversuch erfolgen und mit dem Zusammenbau des Bündels begonnen werden.
- AP2: Ein Mikrometer soll in der abgeschirmten Boxenlinie des KIT-INE installiert und getestet werden. Eine bestrahlte Hüllrohrprobe soll ausgewählt und charakterisiert werden. Anschließend ist das Herauslösen des Brennstoffs aus dem Hüllrohr und eine anschließende nochmalige Charakterisierung der Probe vorgesehen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Rheinisch-Westfälische Hochschule Aachen (RWTH),		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>1501615</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Atomistische Untersuchung der Auswirkung von Strahlenschäden auf die Brennelementintegrität in der langfristigen Zwischenlagerung		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 134.549,83 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Nabbi	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Untersuchung der strukturellen Integrität abgebrannter Brennelemente ist von zentraler Bedeutung für Sicherheitsaussagen hinsichtlich der langfristigen Zwischenlagerung und einer späteren Rekonditionierung. Die Hüllrohre bilden, nach der Brennstoffmatrix selbst, die zweite und innerhalb der Transport- oder Lagerbehälter die letzte Barriere gegen einen Austritt der im Brennstoff enthaltenen Radionuklide. Vor diesem Hintergrund besteht zunehmend großes Interesse an Methoden zur Ermittlung der Beeinträchtigung der werkstoffphysikalischen Eigenschaften der Hüllrohrwerkstoffe durch strahlenbedingte Schädigungsmechanismen und ihre Auswirkungen.

Das Gesamtziel des Projekts besteht in der Untersuchung der Frage der Sicherheit und Integrität abgebrannter Brennelemente mit einem verlängerten Zeithorizont der Zwischenlagerung. Die Untersuchung soll mittels eines multiskalaren Verfahrens bestehend aus atomistischen, molekular- und clusterdynamischen Modellen erfolgen. Mithilfe der Modelle sollen Aussagen über die Entstehung von Defektclustern und Mikrostrukturen sowie darauf aufbauend über die Veränderung strukturmechanischer Kenngrößen des Hüllwerkstoffs abgeleitet werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Strahlungsinduzierte Punktdefekte und Gitterschäden
- AP2: Berechnung atomarer Defektkaskaden
- AP3: Bildung von Defekt-Clustern und Mikrostrukturen
- AP4: Anwendung des multiskalaren Verfahrens

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Während der Berichtsperiode wurden die Auswirkungen des Neutronenfeldes auf die Gitterstruktur betrachtet, von aus ihrer Gitterposition herausgestoßenen Atomen hin zu den sich herausbildenden Defektkaskaden. Dazu wurde zunächst die Neutronenfluenz und das -spektrum in den Brennelementen mit Hilfe des Monte-Carlo-Programms MCNP bestimmt. Als Ergebnis der Neutronenbestrahlung erfolgt die Freisetzung von Gitteratomen (Primary Knock-on Atoms, PKA), die abhängig von ihrer kinetischen Energie kaskadenartige Defekte bewirken. Die Bestimmung der Energieverteilung dieser PKA als Auslöser von Defektkaskaden wurde mit dem Programmpaket SPECTER unter Verwendung des berechneten Neutronenspektrums aus den MCNP-Berechnungen bestimmt.
- AP2: Die Berechnung der Verteilung und der Struktur von Defektkaskaden, die mit PKA in der ersten Phase der Defektentwicklung entstehen, erfolgt über Molekulardynamik (MD)-Simulationen. Hierzu wurden Untersuchungen zum Modellaufbau sowie die Aufbereitung der molekulardynamischen Parameter unternommen und die erste Testsimulation mit einer angenommenen PKA-Energie aus dem gesamten Energiespektrum durchgeführt.
- AP3: Zur Bildung strahlungsinduzierter Defekt-Cluster und Mikrostrukturen erfolgte eine Literaturrecherche.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Ergänzende Berechnungen zur Vervollständigung des ermittelten Energiespektrums der atomaren Primärdefekte
- AP2: Simulation von primären Defektkaskaden im Gitter des Zry-4-Werkstoffs und Ermittlung der räumlichen Verteilung sowie der Dichte der nach dem Ende der Kaskadenphase im Gitter vorhandenen Defekte
- AP3: Untersuchung der kinetischen Monte-Carlo-Methode für die Modellierung clusterdynamischer Vorgänge (Agglomeration der Defekte) zur Simulation von Mikrostrukturen im Kristallgefüge des Hüllrohrmaterials

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>RS1553A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung (ProbBau)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 15.03.2017 bis 31.12.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 412.580,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Suchard	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des beantragten Vorhabens besteht darin, vorhandene Methoden und Werkzeuge für probabilistische Bauwerksanalysen von Langzeitzwischenlagern weiterzuentwickeln und zu vervollständigen. Hierbei soll das Langzeitverhalten der Lagergebäude besondere Berücksichtigung finden, um Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit besser zu bewerten und ggf. durch geeignete Maßnahmen sicherstellen zu können. Die Arbeiten bei der GRS fokussieren sich dabei auf die Entwicklung probabilistischer Methoden zur Bewertung der längerfristigen Sicherheit von Zwischenlagern.

Bei dem Vorhaben handelt es sich um ein Teilvorhaben des Verbundes „ProbBau“. Verbundpartner ist die TU Kaiserslautern (FKZ: 1501543B).

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Darstellung der Grundlagen für die zuverlässigkeitsorientierte Bewertung und Nachrechnung kerntechnischer Bauwerke
- AP2: Möglichkeiten der Anpassung des Zielzuverlässigkeitsindex für die Nachrechnung bestehender Bauwerke
- AP3: Methodik zur Untersuchung und probabilistischen Analyse der Einwirkungen für die Bewertung und Nachrechnung der kerntechnischen Bauwerke
- AP5: Verwendung von Monitoring-Maßnahmen
- AP6: Methodik zur Entwicklung der vorhandenen Zuverlässigkeit der bestehenden kerntechnischen Bauwerke
- AP7: Entwicklung einer Methodik für die zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnungen kerntechnischer Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer

Der AP4 des Verbundarbeitsplans wird ausschließlich durch den Verbundpartner bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3: Das aktuelle deutsche Regelwerk „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ des BMU wurde in Bezug auf die Einwirkungen „Explosionsdruckwelle“ analysiert. Als wesentliche Anforderung an die bauliche Auslegung für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen sowie für Abstandsanforderungen wird darin vorrangig

auf die Druckwellen-Richtlinie des BMI Bezug genommen. Die Umsetzung der Regelwerksanforderungen wurde am Beispiel einer DWR-Anlage dargestellt. Bei Auslegung der Anlage gegen den Lastfall Flugzeugabsturz (FLAB) gemäß RSK ist der Lastfall „Explosionsdruckwelle“ mit höherfrequenten induzierten Schwingungen mit abgedeckt. Für niederfrequente induzierte Schwingungen kann standortbezogen eine Abdeckung durch den Lastfall Bemessungserdbeben erfolgen. Damit ist der Lastfall „Explosionsdruckwelle“ nicht für alle Standorte bestimmend für die bautechnische Auslegung. Gemäß dem Leitfaden „Probabilistische Sicherheitsanalyse“ des BMU sowie zugehöriger Dokumente muss der Lastfall „Explosionsdruckwelle“ aber einer probabilistischen Analyse unterzogen werden.

- AP6: Die Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung der operativen Zuverlässigkeit bestehender Bauwerke wurde weitergeführt.
- AP7: Für eine vollprobabilistische Ermittlung der operativen Zuverlässigkeit kann prinzipiell die First-Order Reliability Method (FORM) zum Einsatz kommen, die in der pränormativen bautechnischen Forschung weit verbreitet ist. Aufgrund des damit verbundenen zeitlichen Aufwands und deren Komplexität erscheint eine Anwendung bei der baupraktischen Bemessung und Bewertung aber als wenig praktikabel. Daher wurde ein vereinfachter Lösungsansatz zur Sicherstellung des normativ geforderten Zuverlässigkeitsniveaus entwickelt, welcher auf der Verwendung von Quantilen der Verteilungsfunktionen von Einwirkungen und Materialkennwerten beruht. Ferner beinhaltet der Ansatz Sicherheitsfaktoren zur Minimierung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit. Die Mehrzahl internationaler Baunormen basiert auf dem (semi-probabilistischen) Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte, weswegen das Konzept analysiert und ausführlich dargestellt wurde. Das geforderte Zuverlässigkeitsniveau wird dabei durch eine zielführende Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte erreicht. Das Konzept lässt sich für eine Anpassung der in den Baunormen angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte für die Nachrechnung bestehender Bauwerke anwenden. Formal kann dabei die Zielzuverlässigkeit nicht geändert, aber durch angepasste Teilsicherheitsbeiwerte reguliert werden.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP1: Dokumentation der Erkenntnisse zum Stand von Wissenschaft und Technik
- AP2: Dokumentation der Erkenntnisse zur internationalen Normenentwicklung
- AP3: Abschluss der Untersuchungen zur probabilistischen Bewertung und Auslegung von kerntechnischen Bauwerken und Dokumentation
- AP5: Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Monitoring und Dokumentation
- AP6: Abschluss der Entwicklungsarbeiten an der Methodik zur Ermittlung der vorhandenen Zuverlässigkeit und Dokumentation
- AP7: Abschluss der Entwicklungsarbeiten an der Methodik für die zuverlässigkeitsorientierte Bewertung von kerntechnischen Bauwerken und Dokumentation

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>RS1563</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2018 bis 30.04.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 520.315,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. Bahr	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Es sollen strukturmechanische Analysemethoden zur Berechnung und Bewertung der Schädigung von Stahlbetonstrukturen infolge Alterung entwickelt und erprobt werden. Den Fokus der zu untersuchenden Betonstrukturen bilden Gebäude zur Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle, denn die Betriebszeit der Zwischenlager in Deutschland soll, wegen der Verzögerungen bei der Errichtung eines Endlagers, verlängert werden. Zu ausgewählten Alterungsmechanismen sollen vereinfachte Verfahren zur Prognose und Bewertung der Schädigung von Stahlbetonbauwerken erarbeitet werden. Weiterhin sollen ausgewählte Alterungsmechanismen in Materialmodelle zum Betonverhalten aufgenommen werden, um in Simulationen basierend auf der erprobten strukturmechanischen Finite-Elemente-Methode (FEM) im Zeitbereich über die Standzeit der Gebäudestruktur eine Aussage hinsichtlich der strukturellen Veränderung und der Schädigung treffen zu können. Die erarbeiteten Methoden sollen an Versuchen mit kleinskaligen Probekörpern und Gebäudestrukturen validiert und im Rahmen von generischen Berechnungen zur Tragfähigkeit eines Zwischenlagers für den Lastfall Erdbeben erprobt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Ausgehend von der Gesamtheit der Alterungsmechanismen sollen zu den ausgewählten Alterungsmechanismen Kriechen, Schwund und Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) vereinfachte Berechnungsverfahren erarbeitet werden.
- AP2: Die ausgewählten Alterungsmechanismen sollen in ihrer Wirkung in der strukturmechanischen Finite-Elemente-Simulation berücksichtigt werden. Hierfür sollen Implementierungsmöglichkeiten geschaffen werden.
- AP3: Die strukturmechanische Simulation unter Berücksichtigung von Kriechen und Schwund soll anhand von Experimentaldaten, die im Rahmen der zweiten Phase des VeRCoRs-Projekts an Projektteilnehmer verteilt werden, validiert werden. An der zweiten Phase des VeRCoRs-Projekts, das von der Working Group IAGE der OECD/NEA organisiert wird, soll teilgenommen werden.
- AP4: Die strukturmechanische Simulation unter Berücksichtigung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion soll mithilfe von im ASCET-Projekt erzielten Versuchsdaten validiert werden.
- AP5: Es sollen strukturmechanische Simulationen mit einem generischen Analysemodell eines Zwischenlagers deutscher Bauart unter Berücksichtigung von Alterungsmechanismen durchgeführt werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3: Zur Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden wurden die begonnenen Validierungsrechnungen mit den Programmen Moose und Black Bear, die vom Idaho National Laboratory als Open-Source-Projekt entwickelt werden, fortgeführt. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere bei nicht-strukturmechanischen Randbedingungen, wie relative Luftfeuchte und Temperatur, Konvergenzprobleme bei den Simulationsrechnungen auftreten. Dies führt zum Programmabbruch, so dass keine Ergebnisse berechnet werden können. Eine einfache Lösung der Problematik wird durch die nur spärliche Dokumentation der Programme und den nur beschränkt zur Verfügung stehenden Support auf Seiten des Idaho National Laboratory erschwert. In der Nutzergemeinde, die immerhin mehr als 100 Nutzer vor allem in den USA umfasst, konnte bislang noch kein Ansprechpartner im Bereich Betonschädigung gefunden werden.
- AP4: Zur Berücksichtigung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion wurde ein Modell mit dem kommerziellen Prä- und Postprozessor Trelis umgesetzt. Der Einsatz des Prä- und Postprozessors ist notwendig, um einen reibungsfreien Simulationsablauf zu gewährleisten.
- AP5: Zur Berechnung der Tragfähigkeit eines Zwischenlagers wurde ein generisches Simulationsmodell des STEAG-Typs erstellt, um die Integrität bei einer postulierten seismischen Belastung zu untersuchen. Einen entscheidenden Einfluss auf das Gebäude und damit auf die Bauwerksintegrität hat die spezifische Bodengründung am Standort bei einer unterstellten Erdbebenbelastung. Hierzu wurden Materialkennwerte einer typischen Bodengründung aufbereitet und erste Simulationen durchgeführt. Ergebnisse hierzu stehen noch aus.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3: Die Ergebnisse der strukturmechanischen Simulation sollen mit den im Rahmen des VeR-CoRs-Projekts gemessenen Dehnungen an den Messstellen in der Betonstruktur, die den Teilnehmern des VeRCoRs-Benchmarks zugänglich gemacht wurden, verglichen werden.
- AP4: Sobald die Validierung der Programme Moose und Black Bear des Idaho National Laboratory hinsichtlich der strukturmechanischen Wirkung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion abgeschlossen ist, soll die Wechselwirkung von Beton, Bewehrung und AKR simuliert werden.
- AP5: Die Arbeit an der Modellerstellung eines Zwischenlagers vom STEAG-Typ soll fortgesetzt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>RS1586A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Spannungsinduzierte Wasserstoffumlagerung in Brennstabhüllrohren während längerfristiger Zwischenlagerung (SPIZWURZ) – Theoretische Beschreibung, Modellierung und Verifizierung		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 15.06.2020 bis 14.06.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 15.06.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 510.180,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Boldt	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel der geplanten Arbeiten ist die experimentelle und theoretische Bestimmung der Löslichkeit und Diffusion von Wasserstoff in Hüllrohrmaterialien unter mechanischer Spannung. Daraus lässt sich der Fluss sowie das chemische Potential des Wasserstoffs in Hüllrohrmaterialien unter Bedingungen der längerfristigen Zwischenlagerung ausgedienter Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern (TLB) bestimmen.

Das Vorhaben ist ein Teilvorhaben des Verbundes SPIZWURZ. Das Teilvorhaben der GRS hat als Schwerpunkte die theoretische Beschreibung der untersuchten Effekte sowie deren Verifizierung mittels eines Blind-Benchmarks.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Wasserstoffdiffusion im Hüllrohr
- AP2: Spannungszustände zwischen Kernbrennstoff und Zircaloy-Hüllrohr von bestrahlten Brennstabproben
- AP3: Zusammenführung und Auswertung der Ergebnisse
- AP4: Koordination und Austausch der fachlichen Arbeiten
- AP5: Projektmanagement und Projektcontrolling

Die Arbeitspakete AP4 und AP5 werden dabei ausschließlich von der GRS bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Für Spezifikationsrechnungen zum geplanten QUENCH-Versuch wurde ein Datensatz für ATHLET-CD erstellt. Neben einer Referenzrechnung zur Ermittlung der Zielparame-ter wurden Parameterstudien bzgl. der Bündelleistung durchgeführt, um das Errei-chen der ermittelten Zielparame-ter (Starttemperatur 500 °C; Temperaturabfall 1 K/d) unter den sich ändernden Versuchsrandbedingungen (Außentemperatur, Bündelwider-stand) sicherzustellen. Die Simulationen zeigten, dass es durch konstante Leistungsab-senkung möglich ist, die Versuchsziele zu erreichen. Da jedoch gemäß der Simulations-ergebnisse unter den Randbedingungen keine für die Ausrichtung der Hydride ausrei-chend große Umfangsspannung in den Hüllrohren erreicht werden kann, wurden die Zielparame-ter (Starttemperatur 400 °C, Temperaturabfall 0,5 K/d) angepasst.
- AP2: Für die Experimente am KIT-INE wurden Vorausberechnungen mit TESP-ROD durchgeführt, um den Einfluss des Brennstoffschwellens auf das Hüllrohr abzuschätzen. Hierfür wurde ein bereits experimentell umfangreich untersuchter Brennstab aus dem KKW Gösgen nachgerechnet. Der numerisch ermittelte Durchmesserunterschied, der sich durch das Pelletschwellen ergibt, liegt im Bereich von etwa 0,019 mm für den ge-wählten Brennstab.
- AP3: Die Einzelergebnisse der Vorausberechnungen mit ATHLET-CD und TESP-ROD zum Anlagenverhalten der QUENCH-Versuchsanlage und zum Spannungszustand der Hüllrohre wurden zusammengeführt.
- AP4: Im Rahmen eines Kick-Off-Meetings wurden die Randbedingungen für die Versuche am KIT diskutiert und angepasst. Aus den Diskussionen ergab sich u. a. die Notwen-digkeit von abschätzenden TESP-ROD-Vorabrechnungen für die Untersuchungen zum Spannungszustand in den Hüllrohren.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Spezifikationsrechnungen sollen fortgesetzt werden, um einen geeigneten Satz von Anfangs- und Randbedingungen für die Versuche am KIT zu identifizieren. Ferner sol-len die Spezifikationen für den Blind-Benchmark zu den Bündelversuchen erstellt und im Anschluss verteilt werden.
- AP2: Ergebnisse der Vermessungen der Hüllrohre am KIT-INE sollen für die Validierung und Verbesserung des TESP-ROD-Modells für das Brennstoffschwellen herangezogen werden.
- AP3: Erste Simulationen des Wasserstoffverhaltens werden mit TESP-ROD durchgeführt und es erfolgt die erste Zusammenführung mit und Auswertung von experimentellen Ergebnissen.
- AP4: Abstimmungsgespräche werden kontinuierlich fortgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>RS1588</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Langzeitverhalten trocken zwischengelagerter Brennelemente während der verlängerten Zwischenlagerung			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2020 bis 31.08.2023		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.09.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 510.180,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Hannstein	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel der Arbeiten ist die Weiterentwicklung, Qualifizierung und Verifizierung von Rechenmethoden zur belastbaren Vorhersage des Einflusses der verlängerten trockenen Zwischenlagerung auf die Brennelementintegrität. Dazu werden die von der GRS entwickelten Methoden zur Vorhersage der Hüllrohrintegrität von abgebrannten Brennelementen (BE) in beladenen Transport- und Lagerbehältern (TLB) weiterentwickelt.

Die Simulationen und Modellierungen umfassen dabei mechanische und thermo-hydraulische Modelle und Rechenverfahren. Eine Benutzeroberfläche wird entwickelt, mit dem Ziel, den Anwenderkreis durch eine erhöhte Benutzerfreundlichkeit zu erweitern. Ferner wird eine gezielte Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse für die Gewährleistung einer hohen Belastbarkeit der Rechenergebnisse durchgeführt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Methoden und Modellentwicklung
- AP2: Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen
- AP3: Schnittstellen und Benutzeroberflächen
- AP4: Verfolgung aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Für die Teilnahme an einem EPRI-Benchmark zur Thermohydraulik in TLB wurde ein Modell eines beladenen TN-32B Behälters für COBRA SFS erstellt. Als Datengrundlage für den Benchmark dient ein solcher Behälter, ausgerüstet mit Thermoelementen zur Ermittlung von Temperaturprofilen darin befindlicher DWR-BE. Im Anschluss soll das TN-32B-Modell der entwickelten Rechenkette hinzugefügt werden.  
Zur Modellierung von Hydridbildung und -wachstum in TESP-ROD werden aktuell zwei Ansätze verfolgt. Beide sollen physikalischen Zugang zur Simulation des Wasserstoffverhaltens im Hüllrohr bieten. Bei dem ersten Ansatz handelt es sich um ein clusterdynamisches Modell (CD-Modell) zur Simulation der zeitlichen Entwicklung der Längenverteilung der Hydride, das mit wenigen Eingangsparametern auskommt. Der zweite Ansatz basiert auf einem modifizierten Langer-Schwartz-Formalismus (MLS) für Ausscheidungsvorgänge, der in der Literatur für die Beschreibung der Hydridbildung angewandt wird, wozu auch Experimentaldaten vorliegen. Durch dessen Verwendung lässt sich das bisher in TESP-ROD implementierte Modell mit den zum MLS-Ansatz verfügbaren Experimentaldaten vergleichen.
- AP2: Der im Vorgängervorhaben initiierte SEDS-Benchmark wurde fortgeführt und die ersten vorläufigen Ergebnisse ausgewertet. Der Benchmark umfasst die Simulation von DWR-Brennstäben während des Betriebs, der Nasslagerung, der Trocknung und der anschließenden Trockenlagerung. Sieben Teilnehmer beteiligten sich an dem Benchmark, jedoch gab es nur wenige eingereichte Ergebnisse bzgl. der Berechnung der Wasserstoffverteilung im Hüllrohr. Nach Einholung überarbeiteter Ergebnisse und Anmerkungen wurde mit der Berichtserstellung begonnen. Ferner soll basierend auf den Ergebnissen eine Phase 2 für den SEDS-Benchmark erarbeitet werden.
- AP3: Mit der Konzeption der Benutzeroberfläche wurde begonnen. Diese soll es ermöglichen, durch Eingabe von Eingangsparametern (u. a. BE-Typ, BE-Leistung, Behältermodell) Simulationen zu starten. Deren Ergebnisse sollen dann mittels Visualisierungsoptionen ebenfalls über die Benutzeroberfläche ausgegeben werden.
- AP4: Im Berichtszeitraum wurde am EPRI ESCP Winter Meeting und an einem EPRI Workshop on Sensors for Spent Fuel Operations teilgenommen. Ferner beteiligte sich die GRS an der PRG-Sitzung zum OECD/NEA SCIP-IV Projekt sowie an einer Sitzung zur Realisierung eines Langzeitexperiments zu Dry Storage bei Studsvik AB.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Erstellung eines generischen Behältermodells für SWR-BE (Vorbild: CASTOR V/52)
- AP2: Fertigstellung des zusammenfassenden Berichts und Vorbereitung der Phase 2 des SEDS Benchmarks sowie Teilnahme an Phase 2 des EPRI Benchmarks
- AP3: Aufbau Benutzeroberfläche und Weiterentwicklung der Visualisierungsmöglichkeiten

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- F. Boldt et al.: "SEDS Benchmark for fuel rod behavior during dry storage – preliminary results", KERNTECHNIK 85, Dezember 2020
- M. Péridis et al.: "Comparison of numerical and semi-analytical analyses of temperature fields of loaded dry casks", KERNTECHNIK 85, Dezember 2020



## **2.2 Vorhaben Bereich 2 bis 5**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11193A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2013 bis 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.08.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 3.057.537,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kudla	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben ELSA2 hat folgende Ziele: 1. Entwicklung eines Schachtverschlusskonzeptes als standortunabhängiges Grundkonzept für Salz- und Tonsteinformationen. 2. Test von einzelnen Funktionselementen im Labor und in halbtechnischen Versuchen mit Entwicklung, Test und Kalibrierung von Materialmodellen zur Beschreibung des Materialverhaltens für die rechnerische Nachweisführung. Untersuchungsschwerpunkte sind Füllsäulen aus verdichtetem Steinsalz, Widerlagerelemente aus MgO-Beton, Weiterentwicklung der Bauausführung und Qualitätskontrolle von Asphalt dichtungen, Zusatzuntersuchungen zum Bentonitdichtelement (z. B. Integration von Äquipotentialsegmenten), Analyse von Bauzuständen sowie Belastungs- und Strömungsprozessen in FE- und PFC-Modellen. Das Vorhaben ELSA2 kann in den Schwerpunkt 3 der Technologie-Plattform (IGD-TP): "Plugging and Sealing" eingeordnet werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse für HAW-Endlager
- AP2: Planung für halbtechnische Versuche in situ
- AP3: Laborversuche zu den Arbeitsschritten 2.1 bis 2.6
- AP4: Halbtechnische Versuche zu den Arbeitsschritten 2.1 bis 2.6
- AP5: Modellierung
- AP6: Berichterstattung

AP1 und AP6 werden gemeinsam mit BGE TECHNOLOGY federführend bearbeitet. Die TU Bergakademie Freiberg ist federführend für AP2 bis AP4. Bei AP5 ist BGE TECHNOLOGY federführend.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Arbeiten abgeschlossen.
- AP2: Arbeiten abgeschlossen.
- AP3: In Laborversuchen wird im Klimaschrank der Temperatur-Zeit-Verlauf des Großbohrlochversuchs mit MgO-Beton der Rezeptur C3 (3-1-8-Bindemittelphase) nachgestellt. Der Phasenbestand der Proben ändert sich nur noch geringfügig. Der Anteil der primär gebildeten 5-1-8-Bindemittelphase nimmt weiter ab und der Anteil der langzeitstabilen 3-1-8-Bindemittelphase nimmt weiter zu.
- AP4: Der radiale Kontaktdruck zwischen Steinsalz und MgO-Beton C3 ist ca. 710 Tage nach der Betonage noch relativ hoch. Allerdings ist in den letzten 150 Tagen der radiale Kontaktdruck in der unteren Messebene von 6,2 MPa auf 5,9 MPa und in der oberen Messebene von 5,7 MPa auf 5,4 MPa abgesunken. Jahreszeitlich bedingt ist gleichzeitig die Temperatur im Bauwerk von ca. 27 °C auf ca. 25,3 °C gesunken. Für eine Interpretation der Prozesse wird der Verlauf der Messwerte weiter beobachtet.
- AP6: Alle Teilberichte befinden sich in der redaktionellen Bearbeitung. Der zusammenfassende Schlussbericht (ZAB) liegt in Deutsch und Englisch als Entwurf vor.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Keine weiteren Arbeiten.
- AP2: Keine weiteren Arbeiten.
- AP3: Keine weiteren Arbeiten.
- AP4: Fortsetzung der Auswertung der Messwerte am Großbohrlochversuch zum Test eines Verschlusselementes aus MgO-Beton C3 im Steinsalz (über die Laufzeit des Vorhabens hinaus).
- AP6: Fertigstellung und Verteilung des zusammenfassenden Schlussberichts (ZAB) und der Teilberichte der Arbeitspakete. Administrativer Abschluss des Vorhabens.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- J. Biegler, M. Gruner: Grube Teutschenthal: 20 Jahre In-situ-Forschungsarbeiten. Bergbau, 11 (2020), S. 498 - 503
- J. Aurich, M. Gruner, W. Kudla: Untersuchung eines Magnesiabaustoffs mit der langzeitstabilen 3-1-8-Bindemittelphase. Bergbau (2021), Nr. 1, S. 26 – 31

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11193B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2013 bis 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.08.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.074.607,85 EUR	<b>Projektleiter:</b> Herold	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen dieses Vorhabens sollen allgemein gültige Grundkonzepte für Schachtverschlüsse in Salz- und Tonsteinformationen entwickelt werden. Das Verschlussystem soll modular aufgebaut sein, damit es an unterschiedliche lokale Situationen und Bedingungen angepasst werden kann. Einzelne Funktionselemente eines solchen Verschlusses sollen im Labor und in halbtechnischen Versuchen auf ihre Eignung getestet werden. Um in der Lage zu sein, rechnerische Zuverlässigkeitsnachweise zu führen, sollen Materialmodelle entwickelt und getestet werden, die in der Lage sind, das Materialverhalten adäquat zu beschreiben.

Um die genannten Ziele zu erreichen, werden vielversprechende Funktionselemente, wie eine Füllsäule aus verdichtetem Steinsalz, Basaltsteinkalotten als Zusatzelemente in Schottersäulen und Bitumendichtelemente im Rahmen von Labor- und In-situ-Untersuchungen getestet. Zu Verbesserung der Einbautechnologie werden Verfahren zur Injektion und zur Vergleichsmäßigung einer Fluidaufnahme von Abdichtmaterial weiterentwickelt und getestet. Begleitet werden diese Untersuchungen durch modelltheoretische Arbeiten zur Analyse von Bauzuständen sowie Belastungs- und Strömungsprozessen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse für HAW-Endlager
- AP2: Planung für halbtechnische Versuche in situ
- AP3: Laborversuche
- AP4: Halbtechnische Versuche
- AP5: Modellierung
- AP6: Berichte

Die BGE TECHNOLOGY GmbH ist federführend beteiligt an den Arbeitspaketen 1, 5 und 6.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP5: Zur Simulation dynamischer Lasten in einer Schottersäule wurde eine Verknüpfung zwischen dem partikelbasierten Code PFC3D und einer kontinuumsmechanischen Umgebung FLAC3D sowie der dynamischen Anregung des Modells durch ein Erdbeben erstellt. Um zeitlich handhabbare Modellierungen zu ermöglichen, wurde die im Modell verwendete Partikelanzahl durch eine Hochskalierung der Korngrößen mit Faktor 6 verringert. Obwohl ein solches Vorgehen den charakteristischen Spannungsverlauf in der Schottersäule beeinflusst, konnten mit einem Skalierungsfaktor von 6 angemessene Ergebnisse simuliert werden. Die mit der Hochskalierung einhergehenden charakteristischen Spannungsverläufe wurden dabei mit der analytischen Lösung validiert. Allerdings kann der Einfluss der Korngrößenskalierung auf die dynamischen Berechnungen auf diese Weise nicht quantifiziert werden. Daher wurden zusätzlich zu den Berechnungsergebnissen mit einem Skalierungsfaktor von 6 auch dynamische Berechnungen mit einem geringeren Skalierungsfaktor von 3 durchgeführt. Die Generierung einer solchen Schottersäule beansprucht mit der beschriebenen Modellerstellung, d. h. kontinuierliche Einbringung einer Partikelmenge über der aktuellen Schütteebene, etwa sechs Monate auf einem 24-Kerne-Rechner und führt zudem zu einer 8-fach größeren Partikelanzahl (991014 Partikel). Die dynamischen Berechnungen für eine Simulationsdauer von 10 Sekunden benötigen etwa einen Monat. Im Berichtszeitraum endeten die zum Jahresanfang aufgesetzten Berechnungen zum Einrieseln der Schottersäule und der letzte Rechenschritt zur dynamischen Berechnung wurde umgesetzt. Bis zum Vorhabensende erfolgte dann eine Auswertung der Berechnung und die Dokumentation im Abschlussbericht.

Die Arbeiten zum Stoffmodell für Bitumen wurden mit Beginn des Berichtszeitraumes abgeschlossen.

AP6: Die Erstellung der Abschlussberichte bildete den Schwerpunkt der Arbeiten im Berichtszeitraum. Die Arbeitspakete 1, 3, 4 und 5 werden in je einem Teilbericht dokumentiert. AP2 (Planung der Versuche) fließt in den AP4-Bericht ein. Der Teilbericht Mikrostrukturuntersuchungen wurde im Berichtszeitraum abgeschlossen. Für den zusammenfassenden Abschlussbericht und den „Synthesis Report“ (in englischer Sprache) wurden Entwürfe erstellt und zwischen den Projektpartnern ausgetauscht.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Keine. Vorhaben endete zum 31.08.2020.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Abschlussberichte gemäß der mit TUBAF abgestimmten Berichtsstruktur.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität des Saarlandes, Campus, 66123 Saarbrücken		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11415D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 31.12.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 802.013,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Kautenburger	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zu Projektbeginn werden Korrosionsprodukte von Zementstein bzw. auch von ausgewählten Betonproben inklusive der organischen Zementzusätze unter den Bedingungen eines Standorts in Tongestein unter hochsalinaren Bedingungen untersucht. Insbesondere wird Portlandzement (PZ Doppel N CEM I 42,5 N) ohne bzw. mit typischen organischen bzw. anorganischen Zementzusätzen (beispielsweise Glenium 51 oder 2-Phosphono-butan-1,2,4-tricarbonsäure, kurz PBTC) studiert werden. Dabei wird untersucht, welche Formationswässer sich im Kontakt mit mittleren bis hohen Salinitäten ausbilden und welche Korrosionsprodukte unter solchen Bedingungen entstehen. Zu diesen Arbeiten gehören die Charakterisierung der hyperalkalinen Porenwässer inklusive der enthaltenen organischen Komponenten sowie die Herstellung entsprechender synthetischer Formationswässer.

Als weiteren Schwerpunkt werden Untersuchungen zu den Wechselwirkungen solcher hochalkaliner Wässer mit den verwendeten Tonen durchgeführt. Hierzu werden Opalinuston sowie Ca-Bentonit (Calcigel), der als Puffermaterial und Bohrlochverschluss im Endlagerkonzept vorgesehen ist, eingesetzt. Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung der Rückhaltung bzw. Mobilität endlagerrelevanter Elemente wie Eu(III), U(VI), Cs und I einzeln und im WASTE Cocktail (entspricht einem Elementgemisch mit einer dem Endlagerinventar vergleichbaren Zusammensetzung) im Tonmineralien und Zementphasen unter dem Einfluss der gebildeten hyperalkalinen Formationswässer hoher Ionenstärke mit Hilfe von Batch-Versuchen und Miniatur-Säulen-Experimenten (MSE).

Das Forschungsvorhaben erfolgt in Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie, dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf und den Universitäten Dresden, Heidelberg, Mainz, München und Potsdam.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Untersuchung der Zusammensetzung von Zementporenwasser (CPW) mittels Auslaugversuchen, Definition und Herstellung von synthetischem Zementporenwasser (ACW) für weitere Untersuchungen
- AP2: Untersuchung der Wechselwirkung von ACW mit Ton (Batch-Versuche mit Opalinuston und Calcigel), Analyse des Korrosionsprozesses von Ton durch hoch-pH und ACW
- AP3: Untersuchung der Sorption von endlagerrelevanten Elementen an unverändertem und verändertem Ton („aged clay“) in Anwesenheit von ACW (Batch-Versuche)
- AP4: Wechselwirkung von CPW bzw. ACW mit Ton bzw. Tongemischen (OPA, Ca-Bentonit) mittels Miniatur-Säulen-Experimenten (MSE)
- AP5: Untersuchung des Einflusses organischer Additive im Eluat aus Korrosionsprozessen auf die Retardation bzw. Mobilisierung von endlagerrelevanten Metallen
- AP6: Rückhaltung von endlagerrelevanten Elementen und Elementgemischen an Zementphasen mittels Batch-Versuchen auch unter dem Einfluss von Zusatzmitteln
- AP7: Untersuchungen zur Rückhaltung von endlagerrelevanten Elementen an Zementphasen mittels dynamischer Sorptionsversuche anhand miniaturisierter Säulenexperimente (MSE)
- AP8: Remobilisierung endlagerrelevanter Elemente von Tonstein (Opalinuston/Calcigel)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Untersuchungszeitraum wurde der Rückhalt von Cs(I), Iodid und Eu(III) sowie dem Waste Cocktail an C-S-H-Phasen in Batch-Experimenten bei niedrigen und hohen Ionenstärken (0,1 M NaCl und 2,55 M verdünnte Gipschlösung, VGL) untersucht. Die acht zugegebenen Konzentrationen der Analyten reichen von 0-250  $\mu\text{mol/l}$ . Alle Experimente wurden im hyperalkalinen pH-Bereich zwischen 12,5 und 13 durchgeführt. Zudem wurde der Einfluss von 2-Phosphono-butan-1,2,4-tricarbonsäure (PBTC) als Zementzusatzstoff untersucht. Die PBTC-Zugabe erfolgte bei der C-S-H-Phasenherstellung (1 %) oder durch direkte Zugabe zu den Hintergrundelektrolytlösungen (0,01 %).

Der Rückhalt von Cs(I) an C-S-H-Phasen ist je nach eingesetzter Konzentration gering bis moderat (max. 38 %). Sowohl die Ionenstärke als auch die Zugabe von PBTC scheinen keinen nennenswerten Einfluss auf den Rückhalt von Cs(I) als Einzelelement an C-S-H-Phasen zu haben. Im Waste Cocktail weist Cs(I) in 0,1 M NaCl keinen bis sehr geringen Rückhalt auf (< 20 %) unabhängig von der PBTC Zugabe. Am höchsten ist der Rückhalt an PBTC-haltigen C-S-H-Phasen. In VGL ist dagegen kein Rückhalt von Cs(I) zu beobachten.

In 0,1 M NaCl Lösung ist der Rückhalt von Iodid als Einzelelement unabhängig von der eingesetzten Konzentration sehr gering (< 10 %). Es konnte kein relevanter Einfluss des PBTCs auf die Retention festgestellt werden. In 2,55 M VGL ist der Rückhalt von Iodid ab einer Konzentration von 25  $\text{nmol/l}$  sehr hoch (> 90 %). In PBTC-haltiger VGL ist der Rückhalt ab einer Konzentration von 25  $\text{nmol/l}$  bis 500  $\text{nmol/l}$  gering (< 20 %) und ab einer zugesetzten Konzentration von 2500  $\text{nmol/l}$  Iodid hoch (ca. 70 %). Der Rückhalt sinkt jedoch mit steigender Konzentration und liegt bei der Endkonzentration von 250  $\mu\text{mol/l}$  im moderaten Bereich (ca. 55 %). An PBTC-haltigen C-S-H-Phasen unter dem Einfluss von hohen Ionenstärken weist Iodid mit steigender Konzentration einen geringen Rückhalt auf. Der Rückhalt wird sowohl an PBTC-haltigen C-S-H-Phasen als auch bei der Zugabe von PBTC in VGL verringert. Im Waste Cocktail konnte in 0,1 M NaCl Lösung kein Rückhalt von Iodid beobachtet werden unabhängig von der PBTC Zugabe. In VGL weist Iodid nur an PBTC-haltigen C-S-H-Phasen und bei kleinen Konzentrationen ( $\leq 500 \text{ nmol/l}$ ) einen Rückhalt auf (etwa 60 %).

Der Rückhalt von Eu(III) an C-S-H-Phasen ist unabhängig von der Ionenstärke und der eingesetzten Konzentration sehr hoch (> 90 %). An PBTC-haltigen C-S-H-Phasen weist Eu(III) unverändert einen sehr hohen Rückhalt auf, so dass kein relevanter Einfluss des bei der C-S-H-Phasen-Herstellung zugesetzten PBTCs auf die Retention von Eu(III) festgestellt werden konnte. In PBTC-haltiger 0,1 NaCl und 2,55 M VGL, ist der Rückhalt jedoch im Mittel wesentlich geringer als ohne Zusatzstoff. Ein Grund hierfür kann die Bildung eines löslichen Komplexes zwischen PBTC und Eu(III) sein. Erst ab einer Konzentration von 50  $\mu\text{mol/l}$  ist der Rückhalt von Eu(III) an C-S-H-Phasen unabhängig von der Ionenstärke wieder hoch. Der Rückhalt von Eu(III) im Waste Cocktail stimmt mit dem aus den Einzelementen überein. Die einzige Ausnahme bilden hohe Eu(III) Konzentrationen in PBTC-haltiger Lösung. Auch hier bleibt der Rückhalt vergleichsweise gering.

U(VI) zeigt im Waste Cocktail an C-S-H-Phasen ohne PBTC-Zusatz in beiden Hintergrundelektrolyten fast quantitativen Rückhalt, der sich mit steigender Konzentration auf etwa 80 % verringert. An PBTC-haltigen C-S-H-Phasen sinkt der Rückhalt bis zu einer U(VI) Konzentration von 10  $\mu\text{mol/l}$  von ca. 90 % auf 50 % ab, steigt dann jedoch, vermutlich durch Ausfällung, wieder an. An C-S-H-Phasen mit PBTC haltigem Hintergrundelektrolyt ist insgesamt ein geringerer Rückhalt zu beobachten. Dieser sinkt ebenfalls mit steigender Konzentration.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die experimentellen Untersuchungen wurden abgeschlossen und mit der Erstellung des Abschlussberichtes wurde begonnen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bischoff, I. (2020): Untersuchung des Retentionsverhaltens von Eu(III) an C-S-H-Phasen unter dem Einfluss von PBTC. Vertiefungsarbeit Analytik, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Universität des Saarlandes  
 Haben, A. (2020): Einfluss von PBTC auf den Rückhalt des Waste Cocktails (Cs(I), Eu(III), U(VI) und Iodid) an C-S-H-Phasen. Vertiefungsarbeit Analytik, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Universität des Saarlandes

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11415F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 30.09.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 30.09.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 546.890,78 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kumke	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Universität Potsdam (Physikalische Chemie) wird Laser-basierte optische Verfahren zur Bearbeitung der im Verbund definierten Arbeitspakete AP1 - AP4 einsetzen bzw. (weiter)entwickeln. Ziel der durchgeführten Arbeiten ist die Entwicklung analytischer, optischer Methoden zur Verbesserung des molekularen Prozessverständnisses der Wechselwirkung von Actinoid-Ionen (bzw. Lanthanoid-Ionen als Analoga) mit Mineralphasen, wie Bentonit, Tongestein und Zementalterationsphasen. Mit Hilfe moderner, ortsauflösender Schwingungsspektroskopie werden komplementär die interessierenden Wechselwirkungen zusätzlich aus Sicht der Mineralphase(n) beschrieben.

Das Vorhaben wird in einem Verbundprojekt gemeinsam mit der Universität Mainz, dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, dem Karlsruher Institut für Technologie, der Universität des Saarlandes, der TU München, der TU Dresden sowie der Universität Heidelberg durchgeführt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Radionuklid-Rückhaltung an Zementalterationsphasen (mittlere bis hohe Ionenstärken):  
- Speziation von Eu(III) an/auf CSH-Phasen mittels zeitaufgelöster Laserspektroskopie (TRLFS) und Schwingungsspektroskopie/-mikroskopie
- AP2: Radionuklid-Rückhaltung an Tongestein (hyperalkalin, mittlere bis hohe Ionenstärke):  
- TRLFS, Raman-Mikroskopie und SFG-Spektroskopie zur Untersuchung von Opalinuston- bzw. Calcium-Bentonit-Oberflächen  
- Speziationsuntersuchungen von Eu(III) bei hohen pH-Werten und Ionenstärken in Lösung
- AP4: Methodenentwicklung:  
- Weiterentwicklung optischer Mikroskopie-Techniken zur Untersuchung von Mineraloberflächen im Zusammenhang mit der Sorption von Lanthanoiden  
- Weiterentwicklung der Transienten-Absorptionsspektroskopie zur Untersuchung von U(VI)-Komplexen mit Modellliganden für Zementadditive und deren Abbauprodukten als auch Adaption des Messaufbaus zur Untersuchung von Sorptionsprozessen an eisenhaltigen Festphasen und der damit verbundenen Lumineszenzlösung

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Für den Probensatz, für welchen in einem entsprechenden Parameterraster der Einfluss der Kontaktzeit (1 - 90 Tage), des  $pH$ -Wertes ( $pH = 10 - 12$ ) sowie des Hintergrundelektrolyten (Milli-Q-Wasser, 2.6 M NaCl-Lösung, verd. Gipshut-Lösung) auf die Interaktion zwischen einer Eu(III) Lösung mit Ca-Montmorillonit (AP2) untersucht werden sollte, wurden die spektroskopischen Untersuchungen abgeschlossen. Mittels verschiedener mathematischer Anpassungen, wie beispielsweise PARAFAC, konnten die unterschiedlichen Eu(III) Spezies (Kantensorptionsspezies am Ton, Einbauspezies in Sekundärphase, Eu-Hydroxid) sowohl in Bezug auf ihre jeweiligen spektralen Signaturen, als auch ihr Lumineszenzabklingverhalten charakterisiert werden.

Zur weiteren Untersuchung des Quenchverhaltens von Uranyl(VI) durch Bromidionen mittels der Transienten-Absorptionsspektroskopie (AP4) wurden Uranyl(VI)-Bromid-Lösungen bei hohen Konzentrationen und Ionenstärken (1 M Bromid) in Wasser gemessen. Es konnte festgestellt werden, dass in Folge des Redoxprozesses (LMCT) sich ein Solvent-Separated-Kontaktpaar (Outer-Sphere-Komplex), bestehend aus Uranyl(V) und  $Br_2^-$ , bildet. Im Vergleich zum Chlorid-System, ist der Geschwindigkeitsbestimmende Schritt ( $k_q$ ) der Lumineszenz-Löschung nicht die Bildung des Solvent-Separated-Kontaktpaares, sondern der Zerfall dieses in zwei separate und vollständig solvatisierte Ionen. Messungen zur Löschung von Uranyl(VI) durch Fe(II) (0,5 M Eisen) wurden durchgeführt. Datenaufarbeitung im Rahmen der Erstellung des Abschlussberichtes bzw. einer Publikation sind fast abgeschlossen.

Mechanistische Untersuchungen zum Einfluss von Eisen auf die Lumineszenz von Lanthanoiden wurden mit in einer Mikrowellen-gestützten Synthese von Polyethylenimin-stabilisierten Nanopartikel erfolgreich durchgeführt. Die Synthese erlaubte dabei eine Dotierung mit Neodym, Ytterbium und auch Eisen in unterschiedlichen Anteilen. Lumineszenzuntersuchungen wurden durchgeführt und zeigten, dass die Emission von Ytterbium nicht durch die Anwesenheit von Eisen gelöscht wird.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die experimentellen Arbeiten zu den Arbeitspaketen wurden abgeschlossen. Der Abschlussbericht wird derzeit erstellt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

K. Burek, S.M. McGee, S. Lange, J. Baaske, G. Deissmann, M. U. Kumke: "TRLFS and DFT study on the time dependent sorption of Eu(III) in CSH phases at alkaline conditions." (2021), in Vorbereitung

T. Haubitz, S. Tsushima, R. Steudtner, B. Drobot, H. D. Burrows, T. Stumpf, M. U. Kumke: "Quenching mechanism of Uranyl by Chloride in aqueous and non-aqueous solution." (2021), in Vorbereitung

M. Acker, B. Drobot, S. Eidner, M. U. Kumke, R. Steudtner: „Europium(III) hydrolysis – the non-luminescent story?“ (2021), in Vorbereitung

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11415H</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.08.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 436.005,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Panak	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel dieses Verbundprojektes ist die Aufklärung des geochemischen Verhaltens von Actiniden im natürlichen Tongestein unter dem Einfluss von Zementalterationsphasen und organischen Zementzusätzen. Die Arbeiten dieses Teilprojektes beschäftigen sich daher mit dem Einfluss diverser Plasticizer und Superplasticizer, die in der Herstellung von Zementen zum Einsatz kommen und im Laufe der Lagerzeit freigesetzt werden können, auf den Quellterm und die Komplexierung von trivalenten Actiniden im Temperaturbereich bis 90 °C. Ergänzt werden diese Untersuchungen durch Arbeiten zur Wechselwirkung mit verschiedenen Modellliganden wie Malonat, Succinat etc. Dadurch sollen wichtige thermodynamische Daten der im geochemischen Milieu im Nah- und Fernbereich eines Endlagers ablaufenden Reaktionen der dreiwertigen Actinidionen erhalten werden. Das Projekt liefert somit einen entscheidenden Beitrag für eine thermodynamisch fundierte Langzeitsicherheitsanalyse von nuklearen Endlagern. Des Weiteren werden grundlegende Erkenntnisse bezüglich des Komplexierungsverhaltens der trivalenten Actiniden und Lanthaniden erhalten, die auch in anderen wissenschaftlichen Bereichen von großer Bedeutung sein können.

Die in diesem Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten erfolgten in direkter Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie, dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, der Universität Mainz, Potsdam, Universität des Saarlandes sowie der TU-München.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: TRLFS Untersuchungen von Cm(III) mit ausgewählten niedermolekularen Liganden sowie makromolekularen Superplasticizern.

AP2: Komplexierung von Np(V) mit zementorganischen Liganden.

AP3: Untersuchungen zur radiolytischen Stabilität von verschiedenen Superplasticizern.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In diesem Berichtszeitraum wurde der Einfluss des pH-Wertes auf die Komplexierung von Cm(III) mit Lactat untersucht. Ziel dieser Untersuchungen war es zu klären, ob sich in Abhängigkeit vom pH-Wert der Koordinationsmodus des Liganden ändert. Lactat kann entweder chelatisierend (*Side-On*) über beide  $\text{COO}^-$ -Gruppen oder (*End-On*) über eine  $\text{COO}^-$ -Gruppe an das Cm(III) koordinieren. Dazu wurden mehrere Messreihen bei unterschiedlichen Protonenkonzentrationen und einer konstanten Ionenstärke von  $I_m = 4 \text{ mol/kg}$  durchgeführt, wobei die Lactatkonzentration im Verlauf der Messung variiert wurde. Sowohl  $\text{NaClO}_4$  als auch  $\text{NaCl}$  wurden als Hintergrundelektrolyten verwendet.

Mithilfe der TRLFS wurden Fluoreszenzspektren der einzelnen Proben aufgenommen. Aus diesen Spektren konnten durch Peakentfaltung die Speziesverteilungen und damit die Molfraktionen von  $[\text{Cm}(\text{H}_2\text{O})_9]^{3+}$ ,  $[\text{Cm}(\text{Lac})]^{2+}$ ,  $[\text{Cm}(\text{Lac})_2]^+$  und  $[\text{Cm}(\text{Lac})_3]$  ermittelt werden. Die Einkomponentenspektren der gebildeten Cm-Lactat-Spezies zeigen eine bathochrome Verschiebung des Emissionsmaximums von 596.6 nm auf 601.3 nm, was die Koordination von Lactat an das Cm(III)-Ion belegt. Mithilfe einer linearen Steigungsanalyse konnte die schrittweise Koordinierung der Lactatliganden an das Cm-Ion bestätigt werden. Aus den experimentellen Daten wurden die konditionalen Stabilitätskonstanten  $\log(K_n)$  für jeden Komplexierungsschritt berechnet. In Übereinstimmung mit Literaturdaten zur Am-Lactat-Komplexierung wurde keine signifikante Abhängigkeit der Konstanten vom pH-Wert beobachtet. Dies führt zu dem Schluss, dass keine pH-induzierte Änderung des Koordinationsmodus erfolgt.

Darüber hinaus zeigt der Vergleich der Daten in den verschiedenen Hintergrundelektrolyten  $\text{NaClO}_4$  und  $\text{NaCl}$ , dass bei der Komplexierung von Cm(III) mit Lactat kein Effekt des Ionenmediums auf die Stabilitätskonstanten der Komplexbildung zu beobachten war.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Bezüglich der Komplexierung von Np(V) mit Dicarboxylat-Liganden wurde folgende Publikation verfasst, die in Kürze eingereicht wird.:

Maiwald, M. M., Müller, K., Heim, K., Rothe, J., Dardenne, K., Rossberg, A., Fröhlich, D., Koke, C., Trumm, M., Skerencak-Frech, A., Panak, P. J.: Complexation of Np(V) with the dicarboxylates malonate and succinate: complex stoichiometry, thermodynamic data and structural information, internal review.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Maiwald, M. M., Trumm, M., Dardenne, K., Rothe, J., Skerencak-Frech, A., Panak, P. J.: Speciation, thermodynamics and structure of Np(V) oxalate complexes in aqueous solution, Dalton Trans. 49, 13359-13371 (2020)

Maiwald, M. M., Müller, K., Heim, K., Trumm, M., Fröhlich, D. R., Banik, N. L., Rothe, J., Dardenne, K., Skerencak-Frech, A., Panak, P. J.: Determination of thermodynamic functions and structural parameters of  $\text{NpO}_2^+$  lactate complexes, New J. Chem. 44, 17033-17046 (2020)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Dr. Andreas Hampel, Grünberger Str. 56, 55129 Mainz		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11446A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 31.03.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 676.496,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hampel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Zusammenarbeit der Projektpartner Dr. Hampel, IfG Leipzig, Leibniz Universität Hannover, TU Braunschweig und TU Clausthal (FKZ 02E11446A bis E) hat das Gesamtziel, Instrumentarien für die Nachweise zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in untertägigen Steinsalzformationen weiterzuentwickeln und für die Anwendung zu qualifizieren, um die Zuverlässigkeit langzeitiger gebirgsmechanischer Prognosen zu verbessern. Als assoziierter Partner beteiligen sich die Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.

Die Arbeiten ergeben sich aus dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Modellierung des thermomechanischen Verformungsverhaltens von Steinsalz, hier fokussiert auf die flache Lagerung, der beim Vergleich aktueller Stoffmodelle und Berechnungsverfahren in drei Verbundprojekten zwischen 2004 und 2016 identifiziert wurde. Es wird eine verbesserte physikalische Beschreibung der in AP1 bis AP4 genannten Phänomene erarbeitet. Begleitend werden spezifische experimentelle Untersuchungen und exemplarische numerische Simulationen mit endlagerrelevanten Detailmodellen durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander, mit experimentellen Befunden und In-situ-Beobachtungen verglichen. Auswirkungen der verbesserten Modellierung werden anhand eines komplexen gebirgsmechanischen 3D-Modells in AP5 demonstriert.

Das Verbundprojekt weist einen engen thematischen Bezug zum BMWi-Vorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“ (KOSINA) auf. Da dort keine Laboruntersuchungen und Weiterentwicklungen der Stoffmodelle durchgeführt werden, bilden die Arbeiten in diesem Verbundprojekt eine notwendige methodische Absicherung und wichtige Ergänzung der in beiden Vorhaben eingesetzten geomechanischen Rechenverfahren und Datensätze.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen
- AP2: Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung
- AP3: Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastungen
- AP4: Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung (Wechselagerung)
- AP5: Virtueller Demonstrator
- AP6: Administrative Arbeiten

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Der Zuwendungsempfänger (ZE) koordiniert das Vorhaben und betreut die Kooperation mit den Sandia National Laboratories. Er beteiligt sich im Teilprojekt A mit dem von ihm entwickelten Stoffmodell CDM und verwendet für die Modellberechnungen der Untertagestrukturen das Finite-Differenzen-Programm FLAC3D (Itasca).

Im Berichtszeitraum entwickelte der ZE sein Stoffmodell CDM weiter. Für die teilweise geänderte Beschreibung der Spannungs-, Temperatur- und Verformungsratenabhängigkeit der folgenden gebirgsmechanischen Phänomene bestimmte er neue Parameterkennwerte für WIPP-Steinsalz: transientes und Kriechen, Schädigungs- und Dilatanzentwicklung, Schädigungsreduktion und Verheilung, Einfluss der Schädigung auf die Verformung, Kriechbruch und Nachbruchverhalten. Dazu rechnete der ZE zahlreiche Kriech-, Festigkeits- und Verheilungsversuche mit WIPP-Steinsalz nach. Mit der neuen CDM-Version und den Kennwerten berechnete er anschließend die beiden Virtuellen Demonstratoren (VD) aus AP5. Der erste VD zeigt den Rückgang der Dilatanz und Schädigung im Konturbereich der Strecke (Schädigungszone) nach dem Einbau eines Dammbauwerks. Mit dem zweiten VD wird der Einfluss einer Grenzfläche (z. B. einer Tonschicht) über der Firste einer Strecke auf die Entwicklung der Schädigungszone berechnet.

Aufgrund der COVID-19-Pandemie konnten im Berichtszeitraum keine persönlichen Treffen der Projektpartner stattfinden. Abstimmungen zwischen den Projektpartnern sowie Präsentationen und Diskussionen der Ergebnisse erfolgten in Videobesprechungen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Vordergrund der weiteren Arbeiten werden im AP5 Berechnungen mit dem zweiten Virtuellen Demonstrator stehen. Da die Langzeitkriechversuche im AP1 nicht vor dem Sommer 2021 abgeschlossen werden können, wird eine Laufzeitverlängerung um 6 Monate notwendig für die Auswertung der Ergebnisse, deren Umsetzung in die Weiterentwicklung der gebirgsmechanischen Modellierung, zugehörige Kennwertbestimmungen, abschließende Modellberechnungen mit den aktualisierten Stoffmodellversionen, den Vergleich der Ergebnisse sowie für das Ziehen von Schlussfolgerungen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstr. 60, 04279 Leipzig		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11446B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.09.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.005.576,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Salzer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Zusammenarbeit der Projektpartner Dr. Hampel, IfG Leipzig, Universität Hannover, TU Braunschweig und TU Clausthal (FKZ 02E11446A bis E) hat das Gesamtziel, Instrumentarien für die Nachweise zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in untertägigen Steinsalzformationen weiterzuentwickeln und für die Anwendung zu qualifizieren, um die Zuverlässigkeit langzeitiger gebirgsmechanischer Prognosen zu verbessern. Als assoziierter Partner beteiligen sich die Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.

Die Arbeiten ergeben sich aus dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Modellierung des thermomechanischen Verformungsverhaltens von Steinsalz, hier fokussiert auf die flache Lagerung, der beim Vergleich aktueller Stoffmodelle und Berechnungsverfahren in drei Verbundprojekten zwischen 2004 und 2016 identifiziert wurde. Es wird eine verbesserte physikalische Beschreibung der in AP1 bis AP4 genannten Phänomene erarbeitet. Begleitend werden spezifische experimentelle Untersuchungen und exemplarische numerische Simulationen mit endlagerrelevanten Detailmodellen durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander, mit experimentellen Befunden und In-situ-Beobachtungen verglichen. Auswirkungen der verbesserten Modellierung werden anhand eines komplexen gebirgsmechanischen 3D-Modells in AP5 demonstriert. März 2019 erfolgte eine Verlängerung des Vorhabens bis 2021.

Das Verbundprojekt weist einen engen thematischen Bezug zum BMWi-Vorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweis-konzeptes“ (KOSINA) auf. Da dort keine Laboruntersuchungen und Weiterentwicklungen der Stoffmodelle durchgeführt werden, bilden die Arbeiten in diesem Verbundprojekt eine notwendige methodische Absicherung und wichtige Ergänzung der in beiden Vorhaben eingesetzten geometrischen Rechenverfahren und Datensätze.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen
- AP2: Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung
- AP3: Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastungen
- AP4: Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung (Wechselagerung)
- AP5: Virtueller Demonstrator
- AP6: Administrative Arbeiten

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Der 23. Projektworkshop fand am 27. Oktober als Videokonferenz statt. Weitere Abstimmungen und Beratungen mit einzelnen Partnern und dem Koordinator erfolgten ebenfalls per Video.

Das IfG beteiligt sich zu einem mit seinen beiden Stoffmodellen – dem erweiterten Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz („Modell Günther/Salzer“) sowie dem visko-elasto-plastischen Modell („Modell Minkley“) an den numerischen Arbeiten. Zum anderen plant und realisiert das IfG Teile des Versuchsprogramms, die sich mit dem Kriechen bei kleinen Spannungen (AP1) und dem Einfluss der Vorschädigung auf die Zugfestigkeit (AP3).

Im Berichtszeitraum hat das IfG dazu die Entwicklung des zweiten virtuellen Demonstrators weiter vorangetrieben und vorläufig abgeschlossen sowie erste Berechnungen durchgeführt. Das Modell soll insbesondere das Zusammenspiel von Scher- und Zugschädigung und den Einfluss von Schwächeflächen auf die Schädigungsentwicklung darstellen. Die Ergebnisse zeigen intensive Schädigung und Konvergenz in der Größenordnung der Werte, die in vergleichbaren realen Situationen beobachtet werden, inklusive Versagen einer Schichtfläche über der Firste.

Im Rahmen des Laborprogramms wurde ein Langzeitversuch (527-TCC34, bisherige Laufzeit fast 4 Jahre) weitergeführt; nach einer isotropen Phase von etwa 200 Tagen Dauer wurde wieder die Laststufe von 4 MPa bei 333 K angefahren, um die Einfluss der Erholung und eine mögliche neue transiente Phase zu untersuchen.

Eine wesentliche Erkenntnis aus diesem Versuch ist, dass nach Temperaturänderungen die neue stationäre Kriechphase vergleichsweise schnell erreicht wird. Daher wurden weitere Versuche angesetzt (613-TCC1 bis 3), die Spannungen von 1, 3 und 5 MPa bei Temperaturen von 373 K, 353 K, 333 K und 313 K untersuchen (etwa 100 Tage pro Temperaturstufe). Ende Dezember 2020 wurde bei allen Versuchen die Stufe mit 333 K angefahren. Diese Versuche werden bis in den Sommer 2021 fortgesetzt, um die Kriechraten bei 333 K und 313 K und die jeweiligen Aktivierungsenergien zu bestimmen; die Ergebnisse können dann auch mögliche Wechsel des dominierenden Kriechmechanismus andeuten.

Die Versuche in den neuartigen Kriechständen (527-TCC38, 42 und 44) zeigen derzeit unklare Ergebnisse, die möglicherweise auf Störeinflüsse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) zurückzuführen sind. Hier sind zur Abklärung weitergehende Analysen erforderlich.

Zum Ende 2020 ging Dr. Klaus Salzer in den Ruhestand; sein Nachfolger als Projektleiter ist Dr. Christoph Lüdeling.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Zunächst sind im Laborprogramm die Ergebnisse der neuartigen Kriechstände zu überprüfen und eventuelle Störeinflüsse zu identifizieren und ggf. neu zu kalibrieren. Die weiteren Versuche (613-TCC1 bis 3) werden nicht vor dem Sommer 2021 abgeschlossen sein. Daneben sind die neuen Ergebnisse des Projektpartners TU Clausthal zur Verheilung auszuwerten und die gewonnenen Erkenntnisse in die Stoffmodelle zu überführen. Im Vordergrund der numerischen Arbeiten werden im AP5 Berechnungen mit dem zweiten Virtuellen Demonstrator stehen.

Wegen der Verzögerung im Laborbereich wird eine Laufzeitverlängerung um 6 Monate notwendig für die Auswertung der Ergebnisse, deren Umsetzung in die Weiterentwicklung der gebirgsmechanischen Modellierung, zugehörige Kennwertbestimmungen, abschließende Modellberechnungen mit den aktualisierten Stoffmodellversionen, den Vergleich der Ergebnisse sowie für das Ziehen von Schlussfolgerungen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11446C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.09.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 490.473,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Zapf	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Zusammenarbeit der Projektpartner Dr. Hampel, IfG Leipzig, Universität Hannover, TU Braunschweig und TU Clausthal (FKZ 02E11446A bis E) hat das Gesamtziel, Instrumentarien für die Nachweise zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in untertägigen Steinsalzformationen weiterzuentwickeln und für die Anwendung zu qualifizieren, um die Zuverlässigkeit langzeitiger gebirgsmechanischer Prognosen zu verbessern. Als assoziierter Partner beteiligen sich die Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.

Die Arbeiten ergeben sich aus dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Modellierung des thermomechanischen Verformungsverhaltens von Steinsalz, hier fokussiert auf die flache Lagerung, der beim Vergleich aktueller Stoffmodelle und Berechnungsverfahren in drei Verbundprojekten zwischen 2004 und 2016 identifiziert wurde. Es wird eine verbesserte physikalische Beschreibung der in AP1 bis AP4 genannten Phänomene erarbeitet. Begleitend werden spezifische experimentelle Untersuchungen und exemplarische numerische Simulationen mit endlagerrelevanten Detailmodellen durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander, mit experimentellen Befunden und In-situ-Beobachtungen verglichen. Auswirkungen der verbesserten Modellierung werden anhand eines komplexen gebirgsmechanischen 3D-Modells in AP5 demonstriert.

Das Verbundprojekt weist einen engen thematischen Bezug zum BMWi-Vorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweis-konzeptes“ (KOSINA) auf. Da dort keine Laboruntersuchungen und Weiterentwicklungen der Stoffmodelle durchgeführt werden, bilden die Arbeiten in diesem Verbundprojekt eine notwendige methodische Absicherung und wichtige Ergänzung der in beiden Vorhaben eingesetzten geomechanischen Rechenverfahren und Datensätze.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen
- AP2: Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung
- AP3: Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastungen
- AP4: Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung (Wechselagerung)
- AP5: Virtueller Demonstrator
- AP6: Administrative Arbeiten

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Im Berichtszeitraum hat der Zuwendungsempfänger (ZE) alle aus dem Vorhaben zur Verfügung stehenden Versuche mit WIPP salt mit dem Stoffmodell Lubby-CF nachberechnet und seinen Kennwertsatz für diesen Salztyp weiter verfeinert. Mit dem neuen Kennwertsatz hat der ZE weitere Simulationsberechnungen zum virtuellen Demonstrator durchgeführt.

Weiterhin hat der ZE mit den Simulationsberechnungen zum Virtuellen Demonstrator II begonnen. Aufgrund der COVID-19-Pandemie konnten im Berichtszeitraum keine persönlichen Treffen der Projektpartner stattfinden. Abstimmungen zwischen den Projektpartnern sowie Präsentationen und Diskussionen der Ergebnisse erfolgten in Videobesprechungen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Vordergrund der weiteren Arbeiten werden im AP5 Berechnungen mit dem zweiten Virtuellen Demonstrator stehen. Da die Langzeitkriechversuche im AP1 nicht vor dem Sommer 2021 abgeschlossen werden können, wird eine Laufzeitverlängerung um 6 Monate notwendig für die Auswertung der Ergebnisse, deren Umsetzung in die Weiterentwicklung der gebirgsmechanischen Modellierung, zugehörige Kennwertbestimmungen, abschließende Modellberechnungen mit den aktualisierten Stoffmodellversionen, den Vergleich der Ergebnisse sowie für Ziehen von Schlussfolgerungen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Universitätsplatz 2, 38106 Braunschweig		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11446D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.09.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 400.307,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Stahlmann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Zusammenarbeit der Projektpartner Dr. Hampel, IfG Leipzig, Leibniz Universität Hannover, TU Braunschweig und TU Clausthal (FKZ 02E11446A bis E) hat das Gesamtziel, Instrumentarien für die Nachweise zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in untertägigen Steinsalzformationen weiterzuentwickeln und für die Anwendung zu qualifizieren, um die Zuverlässigkeit langzeitiger gebirgsmechanischer Prognosen zu verbessern. Als assoziierter Partner beteiligen sich die Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.

Die Arbeiten ergeben sich aus dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Modellierung des thermomechanischen Verformungsverhaltens von Steinsalz, hier fokussiert auf die flache Lagerung, der beim Vergleich aktueller Stoffmodelle und Berechnungsverfahren in drei Verbundprojekten zwischen 2004 und 2016 identifiziert wurde. Es wird eine verbesserte physikalische Beschreibung der in AP1 bis AP4 genannten Phänomene erarbeitet. Begleitend werden spezifische experimentelle Untersuchungen und exemplarische numerische Simulationen mit endlagerrelevanten Detailmodellen durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander, mit experimentellen Befunden und In-situ-Beobachtungen verglichen. Auswirkungen der verbesserten Modellierung werden anhand eines komplexen gebirgsmechanischen 3D-Modells in AP5 demonstriert.

Das Verbundprojekt weist einen engen thematischen Bezug zum BMWi-Vorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“ (KOSINA) auf. Da dort keine Laboruntersuchungen und Weiterentwicklungen der Stoffmodelle durchgeführt werden, bilden die Arbeiten in diesem Verbundprojekt eine notwendige methodische Absicherung und wichtige Ergänzung der in beiden Vorhaben eingesetzten geomechanischen Rechenverfahren und Datensätze.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen
- AP2: Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung
- AP3: Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastungen
- AP4: Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung (Wechselagerung)
- AP5: Virtueller Demonstrator
- AP6: Administrative Arbeiten

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Der Zuwendungsempfänger beteiligt sich an dem Verbundprojekt im Teilprojekt D mit dem Stoffmodell für Steinsalz TUBSsalt und verwendet für die Modellberechnungen der Untertagestrukturen das Finite-Differenzen-Programm FLAC3D der Fa. Itasca.

Im Berichtszeitraum wurde zunächst eine Parameteranpassung für Asse-Speisesalz durchgeführt, um einen geeigneten Parametersatz über alle bisher gelaufenen Versuche zu erzielen. Dabei musste ein Kompromiss zwischen den Verheilungsserien und den Festigkeitsversuchen gefunden werden. Des Weiteren wurde mit diesem neuen Parametersatz ein weiterer Verheilungsversuch, der an der TUC durchgeführt wurde, berechnet. Die Ergebnisse sind zufriedenstellend, die Versuchsergebnisse können gut abgebildet werden.

Außerdem wurden erste Berechnungen an einem zweiten Virtuellen Demonstrator (VD), der vom IfG entworfen wurde, durchgeführt. Mit dem zweiten VD wird der Einfluss einer Grenzfläche (z. B. einer Tonschicht) über der Firste einer Strecke auf die Entwicklung der Schädigungszone bestimmt. Im Berichtszeitraum konnten aufgrund der COVID-19-Pandemie keine persönlichen Treffen stattfinden. Die Abstimmung zwischen den Projektpartnern erfolgte in Form von virtuellen Workshops (27.10.2020, 03.12.2020).

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Vordergrund der weiteren Arbeiten werden im AP5 Berechnungen mit dem zweiten Virtuellen Demonstrator stehen. Da die Langzeitkriechversuche im AP1 nicht vor dem Sommer 2021 abgeschlossen werden können, wird eine Laufzeitverlängerung um 6 Monate notwendig für die Auswertung der Ergebnisse, deren Umsetzung in die Weiterentwicklung der gebirgsmechanischen Modellierung, zugehörige Kennwertbestimmungen, abschließende Modellberechnungen mit den aktualisierten Stoffmodellversionen, den Vergleich der Ergebnisse sowie für das Ziehen von Schlussfolgerungen.

Da aufgrund der COVID-19-Pandemie weiterhin keine persönlichen Treffen stattfinden können, sind weitere digitale Workshops geplant.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11446E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.09.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 784.171,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Lux	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Zusammenarbeit der Projektpartner Dr. Hampel, IfG Leipzig, Leibniz Universität Hannover, TU Braunschweig und TU Clausthal (FKZ 02E11446A bis E) hat das Gesamtziel, Instrumentarien für die Nachweise zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in untertägigen Steinsalzformationen weiterzuentwickeln und für die Anwendung zu qualifizieren, um die Zuverlässigkeit langzeitiger gebirgsmechanischer Prognosen zu verbessern. Als assoziierter Partner beteiligen sich die Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.

Die Arbeiten ergeben sich aus dem Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Modellierung des thermomechanischen Verformungsverhaltens von Steinsalz, hier fokussiert auf die flache Lagerung, der beim Vergleich aktueller Stoffmodelle und Berechnungsverfahren in drei Verbundprojekten zwischen 2004 und 2016 identifiziert wurde. Es wird eine verbesserte physikalische Beschreibung der in AP1 bis AP4 genannten Phänomene erarbeitet. Begleitend werden spezifische experimentelle Untersuchungen und exemplarische numerische Simulationen mit endlagerrelevanten Detailmodellen durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander, mit experimentellen Befunden und In-situ-Beobachtungen verglichen. Auswirkungen der verbesserten Modellierung werden anhand eines komplexen gebirgsmechanischen 3D-Modells in AP5 demonstriert.

Das Verbundprojekt weist einen engen thematischen Bezug zum BMWi-Vorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“ (KOSINA) auf. Da dort keine Laboruntersuchungen und Weiterentwicklungen der Stoffmodelle durchgeführt werden, bilden die Arbeiten in diesem Verbundprojekt eine notwendige methodische Absicherung und wichtige Ergänzung der in beiden Vorhaben eingesetzten geomechanischen Rechenverfahren und Datensätze.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen
- AP2: Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung
- AP3: Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastungen
- AP4: Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung (Wechselagerung)
- AP5: Virtueller Demonstrator
- AP6: Administrative Arbeiten

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Aufgrund der COVID-19-Pandemie führten die Projektpartner im Berichtszeitraum am 27. Oktober den 23. Projekt-Workshop online durch. Auf dem 23. Workshop wurden aktuelle Projektthemen sowie die WEIMOS-Präsentationen diskutiert. Auf dem Workshop stellte der Zuwendungsempfänger (ZE) aktuelle Projektthemen mit Fokussierung auf Arbeiten in AP2, AP3 und AP5 vor.

Der ZE stellte in diesem Zusammenhang die laborativen Arbeiten zur Schädigungsrückbildung (AP2) vor.

Im Berichtszeitraum wurde die Serie 4c) von dem Zuwendungsempfänger mit vier Verheilungsversuchen (Verheilungsphase unter zwei Laststufen: zuerst 26/8,5 MPa und anschließend 26/16 MPa) durchgeführt. Die Serie 4c) wurde im September 2020 beendet. Kurz vor dem Ende der Serie 4c) war der Heizkörper der Versuchsanlage defekt.

Aufgrund der Reparatur des Heizkörpers wurde die Serie 4d) mit erhöhter Temperatur von 70 °C im November 2020 gestartet.

Darüber hinaus wurde auf dem 23. Workshop die Laborergebnisse der durchgeführten Zugversuche (AP3) vorgestellt, die als Grundlage für die Modifikation des Schädigungsansatzes und für die Bestimmung der Material-Parameter dienen.

Des Weiteren wurden unterschiedliche Berechnungen mit verschiedenen Simulationsmethoden zum virtuellen Demonstrator (AP5) durchgeführt. Zur Validierung der Funktionalität des erweiterten Stoffmodells Lux/Wolters/Lerche wurden zusätzliche Berechnungen anhand des Dammjoch-Beispiels durchgeführt. Auf dem 23. Workshop wurden dazugehörige Simulationsergebnisse präsentiert und diskutiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Bei der vierten Serie sind ursprünglich 4 Varianten (4a), 4b), 4c), und 4d)) geplant, um das Verheilungsverhalten unter gleicher mittlerer Beanspruchung zu untersuchen. Um den Einfluss der Fazies von Steinsalz auf die Schädigungsrückbildung zu untersuchen, wurde eine weitere Variante 4e) geplant. Dabei wird die Serie 4e) mit vier Verheilungsversuchen jeweils an zwei Wipp-Salzprüfkörper und zwei Asse-Salzprüfkörper bei  $T = 35 \text{ °C}$  durchgeführt.

Aufgrund der Reparatur der Versuchsanlagen wird eine Laufzeitverlängerung um 6 Monate für die Auswertung der Laborergebnisse, Stoffmodellentwicklung, Parameterermittlung und die anschließenden numerischen Simulationen erforderlich.

Darüber hinaus werden die Festigkeitsversuche an Salzprüfkörpern, die bei der vierten Serie geschädigt und verheilt wurden, gemäß Planung durchgeführt. Der ZE wird damit beginnen numerische Simulationen zum 2. virtuellen Demonstrator (AP5) durchzuführen und die erfolgten laborativen Arbeiten von Verheilungsversuchen auf dem nächsten Workshop präsentieren.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11466</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 31.03.2022		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 2.758.255,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Reiche	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Inhalt dieses FuE-Vorhabens ist die Entwicklung eines Rechenmoduls für das Programmpaket RepoTREND zur Simulation von Prozessen im Nahfeld eines Endlagersystems. Dabei muss die dem Nahfeldmodul zugrundeliegende Softwarearchitektur (sie definiert die grundlegenden Komponenten eines Softwaresystems und beschreibt die Zusammenhänge, die zwischen den Komponenten bestehen) vor allem eine hohe Modularität der Programmstruktur und eine hohe Flexibilität gegenüber neuen Anforderungen aufweisen, um eine einfache Modifikation und Erweiterung des Programmcodes zu gewährleisten. Die Entwicklung einer Softwarearchitektur mit den genannten Hauptmerkmalen ist eine Voraussetzung für den Erfolg des gesamten Projekts und beeinflusst maßgeblich den erforderlichen Aufwand für die Entwicklung des Programmcodes. Die Erstellung relevanter Softwarearchitektur gilt deswegen als das wichtigste Teilziel des Projekts.

Die Arbeiten dienen als Grundlage für die Durchführung von Modellrechnungen zur integrierten Analyse der Langzeitsicherheit in zahlreichen aktuellen und zukünftigen Projekten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Anforderungsanalyse und Wissensmanagement.

Anforderungen werden ermittelt, spezifiziert, analysiert, strukturiert, abgestimmt und bewertet. Das Wissensmanagement umfasst sowohl interne Maßnahmen (wie Know-How-Transfer durch interne Diskussionsrunden) als auch das Einbeziehen des Know-Hows von externen Experten (z. B. durch die Teilnahme an fachlichen Konferenzen).

AP2: Vorarbeiten für die Codeentwicklung.

Neue Konzepte und Modelle müssen erstellt werden: konzeptionelles, mathematisches und numerisches Modell des Nahfeldmoduls, Entwurf der Softwarearchitektur, Entwurf einzelner Programmkomponenten, Optimierungskonzepte.

AP3: Codeentwicklung.

Umsetzung der in AP2 erarbeiteten Konzepte in einen Programmcode.

AP4: Test, Qualitätssicherung, Dokumentation.

Umfangreiche Tests werden in allen Programmentwicklungsphasen durchgeführt. Die folgenden QS-Maßnahmen werden umgesetzt: Standardisierung der Arbeitsprozesse, Versions- und Konfigurationsmanagement, Release-Freigabe, Bugtracking, Lokalisierung von Problemen, Programmkommentare, Konventionen, Review des Programmcodes. Die gesamte Entwicklung über alle Phasen wird ausführlich dokumentiert.

- AP5: Verfolgung von Anforderungen aus aktuell laufenden FuE-Projekten.  
Die Anforderungen aus den aktuell laufenden FuE-Projekten werden aufgenommen und so weit analysiert, dass eine Entscheidung getroffen werden kann, ob eine Anforderung bei der aktuellen Entwicklung berücksichtigt werden kann oder später, im Rahmen eines separaten Projekts bzw. Arbeitspakets, realisiert werden soll.
- AP6: Berichte zum Projektfortschritt.  
Alle durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse werden in Halbjahres- und Jahresberichten sowie im Abschlussbericht dokumentiert.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In dem zu berichtenden Zeitraum wurde im Wesentlichen an den Arbeitspaketen 3 und 4 gearbeitet.

- AP2: Folgende Konzepte wurden ausgearbeitet:
- Konzept zu einer flexiblen, voneinander unabhängigen Definition von relativen Permeabilitäten und Kapillardruckfunktionen,
  - Mehrere Konzepte zum Wechsel der Primärvariablen (Evaluierung folgt).
- XENIA-Module, die für die Definition eines Nahfeld-Rechenlaufs erforderlich sind, wurden weiterentwickelt.
- AP3: Die Umsetzung von bereits existierenden Konzepten wurde fortgesetzt.  
Im Rahmen der Performanceoptimierung wurden mehrere Löser für Lineargleichungssysteme integriert sowie einige Performanceindikatoren eingebaut.  
Im Rahmen der Codepflege bereits vorhandener Datenstrukturen in NaTREND wurden einige Korrekturen und Erweiterungen vorgenommen. Dabei wurden u. a. einige mit C++17 zur Verfügung stehende neue Funktionalitäten integriert.
- AP4: Es wurden umfangreiche Vergleichsrechnungen insbesondere bezüglich des Basisprozesses Zwei-Phasen-Fluss durchgeführt. Die vorhandene Bibliothek von automatischen Testfällen wurde entsprechend der aktuellen Entwicklung angepasst und durch neue Testfälle erweitert.  
Die entwickelten Konzepte, die zugrundeliegenden Entscheidungen sowie der Projektfortschritt wurden dokumentiert.
- AP6: In dem zu berichtenden Zeitraum erfolgte eine Verlängerung/Aufstockung des Vorhabens.  
Der vorliegende Bericht sowie der Jahresbericht wurden erstellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im nächsten Halbjahr soll überwiegend an AP3 und AP4 gearbeitet werden, wobei der Schwerpunkt bei der Umsetzung des Schadstofftransports liegen soll.

Die Arbeiten zur Bereitstellung eines Rechengittergenerators werden fortgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11486A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.09.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 30.09.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 469.799,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Wolf	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Vorhaben BASEL soll eine Vorgehensweise entwickelt werden, die eine nachvollziehbare Abwägung zwischen den Anforderungen an die Sicherheit während der Betriebsphase und der Langzeitsicherheit erlaubt. Für die deutschen Endlagerkonzepte in Ton- und Salzgestein werden auf der Basis von FEP die Abhängigkeiten zwischen Betriebs- und Nachverschlussphase dokumentiert. Darauf basierend sollen Methoden und Ansätze entwickelt werden, die eine nachvollziehbare Bewertung der Abhängigkeiten von Betriebs- und Nachbetriebsphase erlauben. Des Weiteren werden im Rahmen der Arbeiten die Grundzüge für ein Sicherheitskonzept in der Betriebsphase erstellt und geprüft, ob es Harmonisierungsbedarf zwischen den Sicherheitskonzepten der Betriebs- und Nachverschlussphase gibt. Mit diesem Vorhaben werden neuartige konzeptionelle Ansätze und methodische Voraussetzungen geschaffen, die es erlauben, einen konsistenten und in sich geschlossenen Sicherheitsnachweis zu führen. Die gemeinsame Bearbeitung des Vorhabens durch die BGE TECHNOLOGY und die GRS, insbesondere deren Arbeiten auf dem Gebiet der Betriebs- und Langzeitsicherheit und Mitarbeit in entsprechenden internationalen Gremien bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Durchführung des Vorhabens.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm umfasst die folgenden Arbeitspakete:

- AP1: Grundlagen (rechtlicher Rahmen, internationale Empfehlungen, Endlagerkonzepte)
- AP2: Grundzüge eines Sicherheitskonzepts für die Betriebsphase
- AP3: Zusammenstellung eines Kataloges mit FEP beim Bau und Betrieb eines Endlagers
- AP4: Bewertung der Betriebsphase hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Langzeitsicherheit
- AP5: Bewertung der Nachverschlussphase hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den sicheren Betrieb eines Endlagers
- AP6: Methoden und Ansätze
- AP7: Dokumentation

GRS ist federführend für die Arbeitspakete 1, 4, 6 und 7.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeiten zu AP1 bis AP6 sind abgeschlossen.

AP7: Fertigstellung der Dokumentation der Arbeitsergebnisse aus dem Vorhaben BASEL in den folgenden drei Berichten (siehe 5.):

- Synthesebericht
- FEP-Katalog inkl. Bewertung des Einflusses auf die Nachverschlussphase und
- Ableitung von EVI und von Maßnahmen zur Beherrschung der EVI.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Vorhaben wurde zum 30.09.2020 beendet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Wolf, J., Lommerzheim, A., Bertrams, N., Buhmann, D., Filbert, W., Förster, B., Herold, P., Leonhard, J., Noseck, U., Prognitz, S. (2020): Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und der Langzeitsicherheit, GRS-617, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Braunschweig

Herold, P., Bertrams, N., Buhmann, D., Filbert, W., Förster, B., Leonhard, J., Lommerzheim, A., Noseck, U., (2020): Beschreibung der generischen Endlagersysteme für das Vorhaben BASEL, GRS-618, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Braunschweig

Lommerzheim, A., Förster, B., Bertrams, N., Buhmann, D., Herold, P., Leonhard, J., Noseck, U., Wolf, J. (2020): Ableitung von Einwirkungen von innen für die Betriebsphase eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle, GRS-619, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Braunschweig

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11486B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.09.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 30.09.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 598.901,22 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Lommerzheim	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das wesentliche Ziel des Vorhabens ist es, eine Vorgehensweise zu entwickeln, die eine nachvollziehbare Abwägung zwischen den Anforderungen an die Sicherheit während der Betriebsphase eines Endlagers für ausgediente Brennelemente und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und der Langzeitsicherheit erlaubt. Für die deutschen Endlagerkonzepte in Ton- und Salzgestein werden auf der Basis von FEP die Abhängigkeiten zwischen Betriebs- und Nachverschlussphase dokumentiert. Darauf basierend sollen Methoden und Ansätze entwickelt werden, die eine nachvollziehbare Bewertung der Abhängigkeiten von Betriebs- und Nachbetriebsphase erlauben. Des Weiteren werden im Rahmen der Arbeiten die Grundzüge für ein Sicherheitskonzept in der Betriebsphase erstellt und geprüft, ob es Harmonisierungsbedarf zwischen den Sicherheitskonzepten der Betriebs- und Nachverschlussphase gibt. Mit diesem Vorhaben werden neuartige konzeptionelle Ansätze und methodische Voraussetzungen geschaffen, die es erlauben, einen konsistenten und in sich geschlossenen Sicherheitsnachweis zu führen. Die gemeinsame Bearbeitung des Vorhabens durch die BGE TECHNOLOGY und die GRS, insbesondere deren Arbeiten auf dem Gebiet der Betriebs- und Langzeitsicherheit und Mitarbeit in entsprechenden internationalen Gremien bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Durchführung des Vorhabens.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm umfasst die folgenden Arbeitspakete:

- AP1: Grundlagen (rechtlicher Rahmen, internationale Empfehlungen, Endlagerkonzepte)
  - AP2: Grundzüge eines Sicherheitskonzepts für die Betriebsphase der über- und untertägigen Anlagen
  - AP3: Zusammenstellung eines Kataloges mit FEP beim Bau und Betrieb eines Endlagers (umfasst nach der Aufstockung über- und untertägige Anlagen)
  - AP4: Bewertung der Betriebsphase hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Langzeitsicherheit
  - AP5: Bewertung der Nachverschlussphase hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den sicheren Betrieb eines Endlagers
  - AP6: Methoden und Ansätze (Fortführung der Methodenentwicklung im Zuge der Aufstockung)
  - AP7: Dokumentation
- BGE TECHNOLOGY GmbH ist federführend für die Arbeitspakete 2, 3 und 5.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP3: Abschließende Prüfung des FEP-Katalogs und Erstellung eines Berichtes  
Fertigstellung des EVI-Berichtes

AP4: Abschluss der Dokumentation der technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Vermeidung bzw. zur Reduzierung der Konsequenzen von Einwirkungen von Innen (EVI)

AP5: Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Betriebs- und Nachverschlussphase

AP7: Fertigstellung des Abschlussberichtes zum Gesamtvorhaben BASEL

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine. Alle Arbeiten wurden termingerecht abgeschlossen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11547A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2017 bis 31.07.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.07.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 472.614,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Brohmann	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel ist die Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle im Hinblick auf Wechselwirkungen zwischen Technik und Sozialem. Dazu wird ein differenziertes, systematisiertes Verständnis sozio-technischer Zusammenhänge und Herausforderungen entwickelt und fortgeschrieben. Im Ergebnis werden wissenschaftliche Konzepte für die Analyse sowie Handlungsempfehlungen für die Politik zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen – u. a. in Governance- und Management-Strukturen – entwickelt. Die Arbeitspakete 1 und 5 werden gemeinsam von ITAS, Öko-Institut und FFU bearbeitet. Alle Arbeitspakete sind durch interdisziplinäre Schnittstellen verbunden.

Das Vorhaben hat fachlich-inhaltliche Bezüge zum Ende 2019 gestarteten Projekt TRANSENS, in dem die transdisziplinäre Methodik in der Entsorgungsforschung weiterentwickelt und angewendet werden soll. Hier werden auch Erfahrungen und inhaltliche Ergebnisse aus SOTEC-radio aufgegriffen und vertieft.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Spezifizierung der sozio-technischen Herausforderungen (zusammen mit ITAS und FFU)
- AP3: Reversibilität in Entscheidungsprozessen
- AP3.1: Bestehende Konzepte für und Erfahrungen mit reversiblen Prozessen
- AP3.2: Partizipative Verfahren im Kontext reversibler Entscheidungsprozesse
- AP3.3: Entwicklung von Handlungsempfehlungen
- AP5: Robuste Governance-Strukturen, Kohärenz und Institutionalisierung von Langzeitprozessen (zusammen mit ITAS und FFU)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeiten zu AP3 sowie zu AP5 konnten – wie berichtet – im ersten Halbjahr 2020 abgeschlossen werden. In diese Schlussergebnisse konnten auch wichtige Hinweise aus der Abschlusskonferenz am 11./12.2.20 in Berlin aufgenommen werden, die sowohl die Schlussfolgerungen als auch die Handlungsempfehlungen unterstützen konnten.

Im Berichtszeitraum des 2. Halbjahres standen die inhaltlichen und organisatorischen Arbeiten an der Abschlusspublikation des Sammelbandes im Fokus.

Hierzu gehörten die Themensetzung und weitere inhaltliche Abstimmung des Bandes sowie die Ansprache und Betreuung von internen und externen Autor\*innen. In einem umfangreichen - mehrstufigen - Reviewverfahren wurde gemeinsam mit FFU und ITAS die Qualitätssicherung der Beiträge durchgeführt. Daneben oblag dem Öko-Institut die Redaktion und das Lektorat der Beiträge.

Das Öko-Institut verantwortete die Autorenschaft folgender Beiträge:

Mbah, M.; Brohmann, B. (2021): Das Lernen in Organisationen Voraussetzung für Transformationsprozesse und Langzeit-Verfahren. In: Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidoro Losada, Ana Maria (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Bielefeld: transcript

Mbah, M.; Brohmann, B.; Chaudry, S.; Seidl, R. (2021): Reversibilität im Kontext der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Begriffsbestimmung und Entwicklung eines konzeptionellen Ansatzes von Reversibilität. In: Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidoro Losada, Ana Maria (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Bielefeld: transcript

Chaudry, S.; Seidl, R. (2021): Expertendissens und das reversible Verfahren der Suche nach einem Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle. In: Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidoro Losada, Ana Maria (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Bielefeld: transcript

In Kooperation mit FFU und ITAS entstanden die folgenden Kapitel:

Mbah, M.; Kuppler, S. (2021): Raumsensible Long-term Governance zur Bewältigung komplexer Langzeitaufgaben Anforderungen im deutschen Entsorgungskontext. In: Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidoro Losada, Ana Maria (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Bielefeld: transcript

Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidoro Losada, Ana Maria (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Bielefeld: transcript

Brunnengräber, A.; Isidoro Losada, A.; Brohmann, B.; Hocke, P. (2021): Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit soziotechnischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. In: Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidoro Losada, Ana Maria (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Bielefeld: transcript

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Beiträge aus AP5 sowie aus dem Sammelband wurden im Laufe des vierten Quartals 2020 bereits auf verschiedenen Workshops und Konferenzen vorgestellt. Weitere Vorträge sind für 2021 geplant.

Dabei konnten einzelne Aspekte und Empfehlungen aus SOTEC-radio bereits im nachfolgenden TRANSENS Vorhaben aufgenommen und fortentwickelt werden, auch zum aktuellen Standortauswahlverfahren konnten fachlich-inhaltliche Hinweise an BASE und BGE sowie NBG gegeben werden.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Der Abschlussbericht AP5 wurde fristgerecht zum Ende des Vorhabens vorgelegt, die Veröffentlichung des Sammelbandes wurde vorbereitet und ist für 2021 eingeleitet:

Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidoro Losada, Ana Maria (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Bielefeld: transcript

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11547B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2017 bis 31.07.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.07.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 399.013,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hocke-Bergler	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel ist die Erfassung, Beschreibung und Bewertung der Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Technik und Sozialen. Dazu wird ein differenziertes, systematisiertes Verständnis der jeweiligen Zusammenhänge und Herausforderungen entwickelt und fortgeschrieben. Im Ergebnis werden wissenschaftliche Konzepte für die Analyse sowie Handlungsempfehlungen für die Politik zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen in Governance- und Management-Strukturen entwickelt. Die Arbeitspakete 1 und 5 werden gemeinsam von ITAS, Öko-Institut und FFU bearbeitet. Alle Arbeitspakete haben Querverbindungen mit interdisziplinären Schnittstellen.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Spezifizierung der sozio-technischen Herausforderungen (zusammen mit FFU und Öko-Institut)
- AP4: Planungs- und Langzeitprozesse
  - AP4.1: Konzepte für und Erfahrungen mit Langzeit-Monitoring und Governance
  - AP4.2: Management und Langzeitplanung als Sicherheitskultur
  - AP4.3: Entwicklung von (Handlungs-) Empfehlungen
- AP5: Robuste Governance-Strukturen, Kohärenz und Institutionalisierung von Langzeitprozessen (zusammen mit FFU und Öko-Institut)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Nach der Entwicklung erster Handlungsempfehlungen für die Entsorgungspolitik (Abschluss von AP4) und der erfolgreichen Durchführung der SOTEC-radio-Abschlusskonferenz (11./12.2.2020) erstellte ITAS seine verschiedenen Beiträge für die geplante Abschlussveröffentlichung. Dazu gehörte das Verfassen mehrerer Buchbeiträge sowie das Aufsetzen eines anspruchsvollen kritischen Reviewprozesses. Dieser Prozess wurde von ITAS zusammen mit FFU und dem Öko-Institut getragen und über ein Umlaufverfahren für alle Beiträge durchgeführt. Ein ITAS-Kollege gehört zum vierköpfigen Herausgeberteam des Sammelbandes. Seit dem Spätherbst 2020 liegt das abgeschlossene Manuskript mit allen Kapiteln inkl. Einführung und Handlungsempfehlungen im Schlusskapitel bei einem anerkannten Fachverlag. Das Erscheinen ist für den April 2021 angekündigt.

Exklusive ITAS-Buchkapitel sind:

Hocke, P.; Kuppler, S.; Enderle, St.: Robuste Langzeit-Governance und Notwendigkeiten neuer Navigation.

Lösch, A.: Welche Unterscheidungen braucht die Endlagerforschung?

Smeddinck, U.: Reversibilität in Entscheidungsprozessen.

Folgende ITAS-Koautorenschaften sind zu nennen:

Kuppler, S. (zus. m. M. Mbah): Raumsensible Long-term Governance zur Bewältigung komplexer Langzeitaufgaben. Anforderungen im deutschen Entsorgungskontext

Hocke, P. (zus. m. B. Brohman, A. Brunnengräber, A.M. Isiodro Losada): Die Gestaltung robuster Governanceprozesse: Unter welchen Bedingungen kann sie gelingen? Hinweise aus den Ergebnissen des SOTEC-radio-Vorhabens

Hocke, P. (zus. m. A. Brunnengräber, A.M. Isidoro Losada, B. Brohmann): Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit soziotechnischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Ein einleitender Beitrag

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Lauf des Jahres 2021 werden Ergebnisse in Vorträgen präsentiert und in neue Projekte einfließen. Der Abschlussbericht zu AP5 liegt vor.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Brunnengräber, A.; A.M. Isidoro Losada; B. Brohmann; P. Hocke: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit soziotechnischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Ein einleitender Beitrag. In: Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen, B. Brohmann; A. Brunnengräber; P. Hocke; A.M. Isidoro Losada (Hrsg.), Bielefeld 2021; i. E.: transcript

Brohmann, B.; P. Hocke; A. Brunnengräber; A.M. Isidoro Losada: Die Gestaltung robuster Governanceprozesse: Unter welchen Bedingungen kann sie gelingen? Hinweise aus den Ergebnissen des SOTECradio-Vorhabens. In: Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche, B. Brohmann et al. (Hrsg.), Bielefeld 2021; i. E.: transcript

Hocke, P.; Kuppler, S.; Enderle, St.: Robuste Langzeit-Governance und Notwendigkeiten neuer Navigation. In: Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche., B. Brohmann et al. (Hrsg.), Bielefeld 2021; i. E.: transcript

Lösch, A.: Welche Unterscheidungen braucht die Endlagerforschung? Soziotechnische Gestaltung zwischen Möglichkeit und Unmöglichkeit. In: Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche., B. Brohmann et al. (Hrsg.), Bielefeld 2021; i. E.: transcript

Mbah, M.; Kuppler, S.: Raumsensible Long-term Governance zur Bewältigung komplexer Langzeitaufgaben. Anforderungen im deutschen Entsorgungskontext. In: Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche., B. Brohmann et al. (Hrsg.), Bielefeld 2021; i. E.: transcript

Smeddinck, U.: Reversibilität in Entscheidungsprozessen. Warum brauchen wir ein lernendes Verfahren? In: Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche., B. Brohmann et al. (Hrsg.), Bielefeld 2021; i. E.: transcript

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Freie Universität Berlin, Kaiserwerther Str. 16-18, 14195 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11547C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2017 bis 31.07.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.07.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 383.625,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Brunnengräber	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel ist die Erfassung, Beschreibung und Bewertung der Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Technik und Sozialem. Dazu wird ein differenziertes, systematisiertes Verständnis der jeweiligen Zusammenhänge und Herausforderungen entwickelt und fortgeschrieben. Im Ergebnis werden wissenschaftliche Konzepte für die Analyse sowie Handlungsempfehlungen für die Politik zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen in Governance- und Management-Strukturen entwickelt. Die Arbeitspakete 1 und 5 werden gemeinsam von ITAS, Öko-Institut und FFU bearbeitet. Alle Arbeitspakete haben Querverbindungen mit interdisziplinären Schnittstellen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Spezifizierung der sozio-technischen Herausforderungen (zusammen mit ITAS und Öko-Institut)
- AP2: Regulierung und Interdependenzen
- AP2.1: Interdependenzen zwischen Regulierung und Pfadabhängigkeiten
- AP2.2: Formelle und informelle Beziehungen bei der Regulierung
- AP2.3: Struktur und Wirksamkeit von Institutionen
- AP5: Robuste Governance-Strukturen, Kohärenz und Institutionalisierung von Langzeitprozessen (zusammen mit ITAS und Öko-Institut)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zum Projektende werden die Beiträge für den Abschluss des Vorhabens redigiert und zur Übergabe an den Verlag aufbereitet.

- „Pfadabhängigkeiten in der Endlagerpolitik. Die Bedeutung von Pfadentwicklungen im Kontext der Entsorgungsoptionen und Institutionenarchitektur in der Bundesrepublik Deutschland“ (Isidoro Losada)
- „Soziotechnische Analoga als Erfahrungshintergrund für ein Endlager. Windkraft, Fracking, Carbon Capture and Storage (CCS) und das Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Vergleich“ (Themann/Brunnengräber)
- „Arenen zur Austragung von Dissensen in der Endlagerungspolitik. Ausschlusskriterien als ein in verschiedenen Arenen kontrovers diskutiertes Thema“ (Isidoro Losada/Themann/Häfner)
- „Zum politischen Umgang mit Expert\*innendissens. Das Beispiel der Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland“ (Themann)
- „Herausforderungen der neuen Institutionenarchitektur in der Endlagerung. Vergleichende Analyse der bundesdeutschen Aufsichtsbehörde mit dem belgischen und kanadischen Regulator“ (Di Nucci/Isidoro Losada/Laes)
- „Rolle und Entwicklung politischer Beratungsinstanzen im Themenfeld der bundesdeutschen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ (Isidoro Losada/Themann/Di Nucci)

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Vorhaben endete zum 31.07.2020.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Der Abschlussband von SOTEC-radio mit den oben genannten Beiträgen erscheint im Frühjahr 2021

Brohmann, Bettina; Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Isidora Losada, Ana Mariá (Hrsg.) (2021): Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche. Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen, Bielefeld: transcript (im Erscheinen)

Siehe: <https://www.transcript-verlag.de/978-3-8376-5668-8/robuste-langzeit-governance-bei-der-endlagersuche/>

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11557</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GESAV II)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Felder 3.2 + 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2017 bis 30.04.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 962.943,33 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Mischo	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im vorangegangenen Forschungsprojekt GESAV I wurde eine Rezeptur für einen gefügestabilisierten Salzgrusversatz entwickelt, mit dem nach dem Einbau ein praktisch 100 %-iger Verfüllungsgrad erreicht werden kann. Aufgrund der Gefügestabilisierung wird eine ausreichend hohe Stützwirkung des Versatzes erreicht, so dass nachfolgende Auflockerungen (Rissbildungen) im umliegenden Gebirge ausgeschlossen werden können. Die Anfangspermeabilität des Versatzmaterials liegt bei  $< 10^{-11} \text{ m}^2$ . Die Parameter Verformungswiderstand und Permeabilität verbessern sich mit zunehmender Gebirgskonvergenz. Die Rezeptur des entwickelten Versatzmaterials wurde unter der Patentnummer DE 10 2015 005 288 patentiert.

Das FuE-Projekt GESAV II verfolgt das Ziel, eine optimale Einbautechnologie für die patentierte Rezeptur zu entwickeln. Zum Einbringen von Salzgrusversatz im Endlagerbergbau kommen mechanischer (Schleuder-) und pneumatischer (Blas-) Versatz infrage. Mit beiden Verfahren wird nach dem Stand der Technik je ein Referenzversatzkörper in der Grube Sondershausen der GSES mbH erstellt. Aufbauend auf den Ergebnissen von In-situ-Messungen an den Versatzkörpern und Laboruntersuchungen von entnommenen Probekörpern werden die Verfahren optimiert. Wesentliche Optimierungsparameter sind die Einbaudichte und die Reduzierung technologiebedingter Einflüsse auf das. Mit optimierten Versatzverfahren wird jeweils ein weiterer Versatzkörper erstellt. Aus der vergleichenden Untersuchung der Versatzkörper wird eine Vorzugsvariante zum Einbauverfahren benannt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP7: Pilotversuche zum Einbau
- AP8: Labor- und messtechnische Überwachung der Versatzkörper
- AP9: Nachuntersuchungen des Versatzkörpers
- AP10: Abschlussbericht zum Gesamtvorhaben

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP7: Großversuche abgeschlossen.

AP8: Fortgesetzte kontinuierliche messtechnische Überwachung Versatzkörper III und IV und geochemische Überwachung aller Versatzkörper.

AP9: Untersuchung der Proben von Versatzkörper III am IfG Leipzig gem. Untersuchungsprogramm. Durchführung der Versuche zur geochemischen Quantifizierung des Phasenbestands am IfAC im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung. Durchführung weiterer Setzung-Feuchtigkeits-Verlaufsversuche am IfBuS. Konzeptionierung der Erweiterung des Laborversuchstandes um eine Druckmesseinrichtung und Vorversuche.

AP10: Abschlussbericht wurde von allen Projektpartnern gemeinsam konzeptioniert.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP7: Großversuche abgeschlossen.

AP8: Fortführung der messtechnischen Überwachung der Versatzkörper III und IV sowie geochemische Überwachung aller Versatzkörper.

AP9: Abschluss der Untersuchung der Proben von Versatzkörper III am IfG Leipzig gem. Untersuchungsprogramm. Durchführung der Versuche zur geochemischen Quantifizierung des Phasenbestands am IfAC im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung. Durchführung weiterer Setzung-Feuchtigkeits-Druck-Verlaufsversuche am IfBuS.

AP10: Erstellung des Abschlussberichts.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Darstellung FuE-Vorhaben GESAV in Firmenmaterial IMKO

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolf-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11567A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH <sup>2</sup> M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1 + 4.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2017 bis 31.03.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 537.360,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Lux	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Bei dem Forschungsvorhaben „BenVaSim“ handelt es sich um ein internationales Simulatoren-Benchmarking-Projekt, dessen Ziel es ist, die numerisch korrekte und geotechnisch grundsätzlich aussagekräftige Funktionsweise unterschiedlicher TH<sup>2</sup>M-Simulationsprogramme zu analysieren. Zu diesem Zweck ist die Simulation von Modellbeispielen unterschiedlichen Komplexitätsgrads mit diesen Simulatoren angedacht. Das übergeordnete Ziel ist dabei die nationale Verfügbarkeit von mehreren qualitätsgesicherten Simulatoren für die Durchführung von fluiddynamischen Analysen zum Verhalten von untertägigen Endlagersystemen im Tonstein- und Salinargebirge als Grundlage für die Erarbeitung von Langzeitsicherheitsanalysen zu Endlagerkonzepten. Das Vorhaben soll in Zusammenarbeit mit der BGR, dem schweizerischen ENSI, der GRS mit ihren Bereichen „Endlagersicherheitsforschung“ (→ BMWi-FKZ: 02E11567B, Verbundprojekt mit TUC) und „Strahlen- und Umweltschutz“ (→ BMUB-FKZ: 3616E03230) sowie dem US-amerikanischen LBNL stattfinden und baut vom Standpunkt des Zuwendungsempfängers TUC aus auf dem BMWi-Forschungsvorhaben mit dem FKZ 02E11041 auf, in dessen Rahmen der FTK-Simulator entwickelt worden ist, der vonseiten der TUC Gegenstand des geplanten Benchmarkings sein wird. Weiterentwicklungen des FTK-Simulators sind ebenfalls im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorgesehen, um eine für die Zielstellung des Benchmarkings erforderliche Vergleichbarkeit der mit den Simulatoren zu generierenden Ergebnisse mit Blick auf relevante, aber bis dato noch nicht vom FTK-Simulator unterstützte Prozesse für Endlagermodelle zu gewährleisten. Vorbereitende Maßnahmen für das Benchmarking sind im Rahmen eines Vorprojekts mit dem BMWi-FKZ 02E11506 erfolgt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1.1: Organisation und Durchführung von Fachtreffen, grundsätzliche Koordination
- AP1.2: Abstimmung der Berechnungsmodelle, Variationen und Parameter
- AP1.3: Weiterentwicklung des FTK-Simulators inkl. Durchführung von Testsimulationen
- AP1.4: Aufbau der Berechnungsmodelle für die Modellbeispiele aus AP1.2
- AP1.5: Durchführung der FTK-Simulationen und Auswertung der Ergebnisse
- AP1.6: Gegenüberstellung der FTK-Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der Partner
- AP1.7: Vorstellung und Diskussion der Arbeiten im nationalen & internationalen Rahmen
- AP1.8: Dokumentation der Arbeiten, Generalisierung der Befunde, Abschlussbericht

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Im vorliegenden Berichtszeitraum ist von der TUC in Abstimmung mit den Projektpartnern das BenVaSim-Symposium 2020 zu Ergebnissen des Kooperationsprojekts organisiert und abgehalten worden. Ursprüngliche Planungen und erste Vorbereitungen für eine Präsenzveranstaltung sind bereits rechtzeitig mit Blick auf die Unsicherheit der Weiterentwicklung der Situation und der Rahmenbedingungen zugunsten einer virtuellen Veranstaltung aufgegeben worden. Das Programm konnte mit wenigen Veränderungen – primär hinsichtlich der Vortragszeiten – gehalten werden, so dass wie geplant auch nicht-projektinterne Fachkollegen Präsentationen vorstellen konnten, die eine Einordnung des BenVaSim-Projekts und der dort erzielten Ergebnisse ermöglichen konnten.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der Projektpartner zum Modell 1.4 (Arbeitsbezeichnung 1.6) konnte noch erfolgen, ein weiteres (virtuelles) Fachtreffen inklusive Diskussion der Ergebnisse ist jedoch nicht mehr zustande gekommen.

Weitere Dokumentationen zum Projekt sind erfolgt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Weitere Dokumentationen der Arbeiten und Ergebnisse der TUC werden erfolgen. Die Vorstellung des Projekts und seiner Ergebnisse auf konkreten weiteren Fachtagungen wird anvisiert.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11577A</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Felder 3.1 + 3.2			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2017 bis 31.05.2023		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2020 bis 31.05.2023	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.078.790,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Müller	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Grundlage des Projektes SUSE ist die 2001 zwischen dem früheren russischen Ministerium für Atomenergie Minatom (jetzt Rosatom) und dem BMWi getroffene Vereinbarung für eine deutsch-russische Kooperation zur internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeit hinsichtlich der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Kristallingesteinen. In den vergangenen 15 Jahren wurden gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die sich auf die Ergebnisse von Erkundungsarbeiten auf mehreren Kristallinstandorten im Nishnekansker Gebiet (nahe Krasnojarsk) stützen und sich seit 2006 auf Untersuchungen des Standortes Yeniseysky konzentrieren, durchgeführt. Im Vorhaben SUSE werden die sicherheitsanalytischen Untersuchungen zu Endlagersystemen in Kristallingesteinen am Standort Yeniseysky weitergeführt. Die Untersuchungen umfassen die Erarbeitung von Verschlusskonzepten, der Charakterisierung der Klüftung kristalliner Gesteine sowie die Durchführung hydrogeologischer Strömungs- und Transportberechnungen. In Abstimmung mit den russischen Kollegen werden zudem Laborexperimente zu den mechanischen Eigenschaften an geklüfteten, wieder mineralisierten Wirtsgesteinen sowie zum Radionuklid-Rückhaltevermögen an kristallinen Kernproben aus dem Untersuchungsgebiet durchgeführt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird das geologische Standortmodell für das Untersuchungsgebiet Yeniseysky aktualisiert und hinsichtlich des Klüft- und Störungszonennetzwerkes präzisiert.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Bemessung des geotechnischen Verschlussystems
- AP2: Gesteineignungsklassifikationen als Positionierungskriterien für Dichtelemente, Bohrlöcher und Auffahrungen im Kristallin
- AP3: Charakterisierung eines Klüft- und Störungszonennetzwerkes am Beispiel des Standortes Yeniseysky
- AP4: Erhebung zusätzlicher Daten an Probenmaterial aus dem Gebiet Yeniseysky
- AP5: Regionale 3D-Strömungs- und Transportmodelle
- AP6: Bewertung und Dokumentation
- AP7: Unterstützung bei der methodischen Planung des Untertagelabors und Spezifizierung des In-Situ-Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP5: Für die Erstellung eines strukturgeologischen-hydrogeologischen Modells und die Durchführung von Transportmodellierungen zur Radionuklidausbreitung im Endlagermaßstab, wird die Geometrie des Kluftsystems auf ein regelmäßiges Gitter eines Kontinuummodells übertragen (fracture continuum Ansatz). Da es allerdings zwischen der analytischen Lösung und den numerischen Modellergebnissen z. T. deutliche Abweichungen gab, wurden im Berichtszeitraum verschiedene Lösungsstrategien diskutiert und anhand verschiedener, daraufhin zugeschnittener Modelle überprüft. In einem ersten Schritt wurde untersucht, ob das Strömungsverhalten in den Kluftzonen anstelle der bislang verwendeten isotropen Permeabilität durch Verwendung einer anisotropen Permeabilität verbessert werden kann. Eine Auswertung der Darcy-Geschwindigkeiten bei Verwendung einer isotropen Permeabilität zeigt, dass deren Richtung aufgrund des durch den fracture continuum Ansatzes zustande kommenden Treppeneffektes nicht einheitlich sind. Zutreffender wäre ein Verlauf mit der Einfallrichtung der eigentlichen Kluftfläche. Eine Auswertung der Darcy-Geschwindigkeiten zeigt, dass durch die Anwendung anisotroper Permeabilitätswerte ein homogeneres Strömungsverhalten erzeugt werden kann. Ein Vergleich der Durchflussraten an den Modellrändern zeigt, dass der relative Fehler gegenüber der Analytik durch die Verwendung von anisotropen Permeabilitätswerten von 25 % auf 7,5 % reduziert werden konnte.

In einem zweiten Schritt wurde überprüft, ob das Strömungsverhalten in den Kluftzonen mit Hilfe eines hydraulischen Gradienten, der parallel zur Kluftichtung verläuft, verbessert werden kann. Bisher wurden hydraulische Randbedingungen gewählt mit zwei unterschiedlichen, aber konstanten Druckbedingungen auf gegenüberliegenden Seiten. Um hingegen einen hydraulischen Gradientenvektor in beliebiger Richtung zu erstellen, wurden linear variierende Druckbedingungen an den einzelnen Modellrändern eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich zwar die Richtungen der Darcy-Vektoren im Bereich des Zuflusses bzw. Abflusses verbessern, allerdings weiterhin ein inhomogenes Strömungsverhalten im Modellinneren erhalten bleibt. Ein Vergleich mit der Analytik zeigt, dass sich die Durchflussraten nur unwesentlich verbessern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass insbesondere durch die Verwendung von anisotropen Permeabilitätswerten die Berechnungsergebnisse verbessert werden konnten.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Rahmen zukünftiger Berechnungen soll für den bisher verwendeten Modellierungsansatz überprüft werden, ob das Schnittvolumen, das die eigentliche Kluft mit der jeweiligen Kontinuumzone bildet, berücksichtigt werden muss. Dies ist z. B. im in Teilzügen vergleichbaren sogenannten Oda-Ansatz der Fall. Des Weiteren ist für das kommende Projektjahr die Entwicklung eines weiteren Modellierungsansatzes (Fremdleistung) geplant. Der Simulationscode OpenGeoSys soll für die Erstellung und Berechnung von Kluftnetzwerken (DFN-Modellen) entsprechend weiterentwickelt werden. Ziel ist es, verschiedenen Ansätze zur modelltechnischen Abbildung von Klüften qualitativ und quantitativ miteinander zu vergleichen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11577B</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2017 bis 31.05.2023		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.322.575,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Flügge	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Vorhaben SUSE werden die sicherheitsanalytischen Untersuchungen zu Endlagersystemen in Kristallingesteinen am Standort Jenessieskij weitergeführt. Die Untersuchungen umfassen die Erarbeitung von Verschlusskonzepten, der Charakterisierung der Klüftung kristalliner Gesteine sowie die Durchführung hydrogeologischer Strömungs- und Transportberechnungen. In Abstimmung mit den russischen Kollegen werden zudem Laborexperimente zu den mechanischen Eigenschaften an geklüfteten, wieder mineralisierten Wirtsgesteinen sowie zum Radionuklid-Rückhaltevermögen an kristallinen Kernproben (Gneiss, Dolerit, Kluftminerale) aus dem Untersuchungsgebiet Yeniseysky in Russland durchgeführt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird das geologische Standortmodell für das Untersuchungsgebiet Yeniseysky aktualisiert und hinsichtlich des Kluft- und Störungszonennetzwerkes präzisiert. Auf dieser Grundlage werden mit den Programmen d<sup>3</sup>f++ und RepoTREND Strömungs- bzw. Transportmodelle aufgebaut und Berechnungen durchgeführt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Bei der Durchführung des Vorhabens werden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP1: Bemessung des geotechnischen Verschlussystems
- AP2: Gesteinseignungsklassifikationen als Positionierungskriterien für Dichtelemente, Bohrlöcher und Auffahrungen im Kristallin
- AP3: Charakterisierung eines Kluft- und Störungszonennetzwerkes am Beispiel des Standortes Yeniseysky
- AP4: Erhebung zusätzlicher Daten an Probenmaterial aus dem Gebiet Yeniseysky
- AP5: Regionale 3D-Strömungs- und Transportmodelle
- AP6: Bewertung und Dokumentation
- AP7: Unterstützung bei der methodischen Planung des Untertagelabors und Spezifizierung des In-situ-Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Die GRS ist federführend in den AP4 und AP5.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das für Ende Oktober 2020 in Moskau geplante „Arbeitstreffen im Rahmen der russisch-deutschen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe“ musste aufgrund der Coronabedingten Reiseeinschränkungen abgesagt werden. Der fachliche Austausch wurde per E-Mail und durch Online-Meetings zwischen den jeweiligen Bearbeitern der Arbeitspakete vorgenommen. Projektbesprechungen (online) zwischen den deutschen Projektpartnern fanden am 20.08.2020, 04.09.2020, 11.11.2020, 19.11.2020 und am 11.12.2020 abgehalten. Das Protokoll des am 25.02.2020 abgehaltenen „Arbeitstreffens im Rahmen der russisch-deutschen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe“ wurde finalisiert und unterschrieben.

- AP4: Die Desorptionsversuche mit Kristallinproben wurden durchgeführt und die Freisetzungen von Cs, Sr, Ba, Ni, Eu, Sm, Gd, Nd, I, Se und U wurden bestimmt. Nach Abschluss der Probenaufschlüsse werden die realistischen  $K_d$ -Werte für diese Spurenelemente bestimmt. Die Quelldruck- und Permeabilitätsversuche mit einem russischen Bentonit wurden abgeschlossen und ausgewertet. Ein unerwartet hoher Quelldruck, der für einen auf  $1,8 \text{ g/cm}^3$  kompaktierter Versuchskörper beobachtet wurde, kann endlagerrelevant sein und wird noch in einem nachgestellten Versuch näher untersucht.
- AP5: Der für die Durchführung von Strömungs- und Transportmodellierungen vorgesehene *Fracture Continuum* Ansatz wurde an kleinen Testmodellen mit den Simulationscodes FLAC3D (BGETEC) und d<sup>3</sup>f++ (GRS) getestet. Da es allerdings zwischen der analytischen Lösung und den numerischen Modellergebnissen z. T. deutliche Abweichungen gab, wurden verschiedene Lösungsstrategien diskutiert und anhand verschiedener, daraufhin zugeschnittener Modelle überprüft. Dabei konnte durch die Verwendung einer anisotropen Permeabilität ein homogeneres Strömungsverhalten erzeugt werden. Zum anderen wurde die Auswirkung der Modellgröße auf den relativen Fehler gegenüber der analytischen Lösung überprüft. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch Einsatz von linear variierenden statt konstanter Druckbedingungen an den einzelnen Modellrändern sich die Strömungsrichtungen an den Modellrändern verbessern, aber nur geringe Auswirkungen auf die Durchflussrate zu verzeichnen waren.
- AP6: Das Programm VIRTUS wurde um eine Schnittstelle zur Integration von Modellergebnissen mit d<sup>3</sup>f++ erweitert und erprobt. Möglichkeiten zur Zusammenarbeit bei der Integration und visuellen Darstellung von Rechenergebnissen mit den Programmen PULSE (IBRAE) und VIRTUS (GRS) wurden mit den russischen Projektpartnern diskutiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Ein russisch-deutsches Arbeitstreffen (online) mit allen involvierten Partnern ist für das Frühjahr 2021 geplant.

- AP4: Die Sorptionsversuche werden abgeschlossen. Ein nachgestellter Versuch mit drei auf  $1,8 \text{ g/cm}^3$  kompaktierten Versuchskörpern wird abgeschlossen. Die Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse mit den russischen Partnern (NO.RAO, IBRAE, IGE RAN, IGEM RAN) wird in Form eines Online-Meetings am 22.01.2021 stattfinden.
- AP5: Weiterführung der Entwicklungsarbeiten zum Fracture Continuum Ansatz, Überprüfung des Einsatzes von Strömungs- und Transportmodellen basierend auf dem Oda-Ansatz.
- AP6: Durchführung eines russisch-deutschen Projekttreffens mit dem Schwerpunkt „Augmented Reality“ (PULSE&VIRTUS).
- AP5: Überprüfung der Anwendungsmöglichkeit der in SUSE entwickelten Strömungsmodelle im Hinblick auf Transportberechnungen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11607A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2017 bis 30.06.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 903.735,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Bischofer	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Primäres Ziel des Verbundvorhabens VESPA II ist, das Verständnis der Lösungseigenschaften und der Rückhaltung von mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukten besonders unter reduzierenden Bedingungen entscheidend zu verbessern.

Ziel des GRS-Teilprojekts VESPA II ist, ein polythermes thermodynamisches Modell zur Beschreibung der Aktivitäten von gelösten Selenspezies unter reduzierenden Bedingungen zu entwickeln.

Darüber hinaus wird die chemische Reaktion von oxidierten Selenspezies bei Fe-Korrosion untersucht, die Lösungseigenschaften von Selenit und Iodid bei Temperaturen über 25 °C werden ermittelt bzw. prognostiziert sowie geochemische Referenzszenarien für potentielle Endlagerstandorte in deutschen Tonstein- und Steinsalzformationen entwickelt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Speziation und Thermodynamik von Spaltprodukten in salinaren Lösungen
- Untersuchung der Rückhaltung von oxidierten Selenspezies beim Kontakt mit Fe(II)-haltigen Korrosionsprodukten
- Geochemische Systemzustände im Nahfeld
- Vergleichende Modellierung der Ausbreitung und Rückhaltung von langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukten
- Projektmanagement und Projektcontrolling

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Anhaltende Probleme bei den kalorimetrischen Messungen der Verdünnungsenthalpie konzentrierter Lösungen konnten durch verschiedene Änderungen an einigen Versuchsparametern endlich behoben werden. Als Ursache wird eine zu langsame Vermischung des zugegebenen Wassers mit der dichteren und viskoserer Salzlösung vermutet, die durch höhere Rührgeschwindigkeiten und längere Zugabezeiten verbessert werden konnte. Dadurch war es möglich, mehrere Messreihen mit Magnesiumiodid-Lösungen in einem breiten Konzentrationsbereich durchzuführen. Die Ergebnisse wurden anschließend zur Bestimmung von Temperaturkoeffizienten für Pitzer-Parameter verwendet. Wechselwirkungsparameter und osmotische Koeffizienten für 40 °C konnten aus der Kombination mit Pitzer-Parametern für  $\text{MgI}_2$ -Lösung bei 25 °C abgeschätzt werden. Ein Vergleich mit experimentellen Messdaten zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Messungen bei 40 °C wurden begonnen, mussten aber wegen eines Gerätedefekts unterbrochen werden.

Isopiestic Messungen an Kaliumselenit-Lösungen bei 25 °C führten zunächst zu Ergebnissen, die nicht kohärent zu früheren Dampfdruck-Daten bei 40 bis 90 °C waren. Die  $\text{K}_2\text{SeO}_3$ -Stammlösung wurde daher nochmals neu angesetzt. Mit dieser neuen Lösung ergaben sich osmotische Koeffizienten, die nahe an den früheren Daten liegen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen musste der Aufbau des Messsystems zur Untersuchung der Speziation von Seleniden verschoben werden. Diese Arbeiten sind nun für das erste Quartal 2021 geplant.

Mit der Titrationskalorimetrie werden Verdünnungsenthalpien von  $\text{MgI}_2$  für 40 °C und eine weitere, höhere Temperatur bestimmt.

Die isopiestic Messungen für das binäre System  $\text{K}_2\text{SeO}_3$ - $\text{H}_2\text{O}$  bei 25 °C werden abgeschlossen.

Anschließend wird das polytherme Modell für das System  $\text{Cs}-(\text{Na}/\text{K}/\text{Mg}/\text{Ca})-\text{Cl}/\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}$  überarbeitet und für das System  $\text{SeO}_3-(\text{Na}/\text{K}/\text{Mg}/\text{Ca})-\text{Cl}/\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}$  ein Modell erstellt.

AP2: Die Batchversuche zur Rückhaltung von Selenit und Selenat durch Fe-II-Korrosionsphasen und metallischem Eisen werden angesetzt.

AP3: Es werden plausible Randbedingungen für geochemische Systemzustände im Nahfeld eines Endlagers zusammengestellt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11607B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2017 bis 30.06.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 515.767,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Müller	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Primäres Ziel des Verbundprojektes VESPA mit der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, dem Karlsruhe Institut für Technologie und dem Forschungszentrum Jülich ist es, Konservativitäten in den Annahmen, die z. Z. für die Radionuklide  $^{14}\text{C}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{129}\text{I}$  und  $^{99}\text{Tc}$  in Langzeitsicherheitsnachweisen angenommen werden, abzubauen. Ziel des Teilvorhabens des HZDR ist die Identifikation von Rückhalteprozessen für das Spaltprodukt  $^{99}\text{Tc}$  und im geringeren Umfang für  $^{79}\text{Se}$ . Dabei werden auch konkurrierende Reaktionen erfasst sowie der Einfluss des Redoxzustandes untersucht. Neben Batchversuchen sind spektroskopische Speziesnachweise ein wichtiger Bestandteil der Untersuchungen. Thermodynamische Daten werden ermittelt und im Fall hinreichender Qualifizierung in die Referenzdatenbasis THEREDA implementiert. Sorptionsparameter werden in die mineralspezifische Sorptionsdatenbank RES<sup>3</sup>T eingebunden. Ein weiteres Ziel stellt die Untersuchung und Charakterisierung der relevanten niederen Oxidationsstufen des  $^{99}\text{Tc}$  dar.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Sorptionsprozesse

AP1.1: Sorption von Selen (0 und -II) an verschiedenen Eisen-Korrosionsphasen und Mineraloxiden

AP1.2: Sorption und Einbau von Tc an verschiedenen Eisen-Korrosionsphasen

AP1.3: Auswirkung der Variabilität von Eisen-Korrosionsphasen auf den Rückhalt von Selen und Technetium

AP2: Tc-Chemie inklusive niedriger Oxidationsstufen

AP3: Datentransfer zur Langzeitsicherheitsanalyse

AP4: Erstellung Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Es wurde die Re-Oxidation von Tc(IV) beladenen Suspensionen von Grünrost außerhalb der Handschuhbox untersucht. Die vorangegangene Entfernung von Tc(VII) aus der Lösung betrug bei diesen Proben 50 % (pH 4,5) und 100 % (pH 7,5 und pH 11,5). Nach drei Monaten in Gegenwart von Sauerstoff fielen diese Werte auf 30 %, 80 %

bzw. 60 %, und in allen Fällen war die Tc-Oxidation mit einer Abnahme des pH-Wertes verbunden.

Mit  $\text{Sn}^{2+}$  und  $\text{Mn}^{2+}$  beladene Aluminiumoxid-Nanopartikel wurden hinsichtlich ihrer Kapazität zur reduktiven Immobilisierung von Tc(VII) untersucht. Dafür wurden Ionenstärke, pH-Werte und die experimentelle Vorgehensweise variiert. Für die binären Systeme ohne Tc wurde ermittelt, dass die  $\text{Mn}^{2+}$ -Sorption an Aluminiumoxid mit steigendem pH-Wert zunimmt. Dagegen ist die  $\text{Sn}^{2+}$ -Sorption unabhängig vom pH-Wert  $\approx 100$  %. Die Ionenstärke beeinflusst die  $\text{Mn}^{2+}$ - und  $\text{Sn}^{2+}$ -Sorption an den  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanopartikeln nicht. Das mit  $\text{Mn}^{2+}$  bzw.  $\text{Sn}^{2+}$  beladene Aluminiumoxid trocknete unter  $\text{N}_2$ . Im Anschluss wurden damit Tc-Retentionsuntersuchungen (Heteroreduktion) durchgeführt. Im Vergleich zu reinen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanopartikeln (6,5 % Rückhaltung) verbesserte  $\text{Mn}^{2+}$  die Tc-Rückhaltung kaum (maximal 20 %), hingegen führte die Sorption von  $\text{Sn}^{2+}$  zu einer Rückhaltung von 80-100 %.

- AP2: Die Levich-Gleichung und die Randles-Sevcik-Gleichung wurden erfolgreich angewendet, um die Reduktionsmechanismen von Tc(VII) in 2 M  $\text{NaClO}_4$  zu identifizieren. Bei pH 2 erfolgt die Reduktion in zwei Schritten: Tc(VII) gewinnt  $2,1 \pm 0,3$  Elektronen und wird zu Tc(V), welches mit der Übertragung von  $1,3 \pm 0,1$  Elektronen schnell zu Tc(IV) reduziert. Bei  $\text{pH} \geq 4$  erfolgt die Reduktion direkt, wobei Tc(VII)  $3,2 \pm 0,3$  Elektronen aufnimmt. Bei beiden pH-Werten lagert sich ein schwarzer Feststoff auf der Arbeitselektrode ab. Mittels NMR Spektroskopie wurde dieser als Tc(IV) identifiziert. Raman-Mikroskopie wurde auf den Feststoff angewendet und zwei Banden ( $374$  und  $1107 \text{ cm}^{-1}$ ) konnten erstmals Tc(IV) zugeordnet werden.
- AP3: Daten zur Tc-Reduktion an  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Nanopartikeln und an  $\text{FeS}_2$  wurden an die GRS übersandt.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

- Identifizierung der Tc-Molekülumgebung nach reduktiver Immobilisierung durch Grünrost und Sn-beladenes Aluminiumoxid mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie an der ROBL Beamline an der ESRF (Grenoble). Identifizierung von Sn-Sekundärphasen durch weitere *a posteriori* Analysen (XRD, Raman-Mikroskopie, XPS).
- Untersuchung der Tc(VII)-Heteroreduktion durch auf Aluminiumoxid sorbiertes  $\text{S}^{2-}$ .

AP2:

- Aufbau einer spektro-elektrochemischen Zelle außerhalb der Handschuhbox.
- Levich- und Randles-Sevcik-Analyse und spektro-elektrochemische Analyse der Tc(VII)-Reduktion in Anwesenheit weiterer Hintergrundelektrolyten, z. B. Sulfat, Nitrat oder kleine organische Moleküle.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

T. Füssel: „Die Wirkung von sorbierten redoxaktiven Spezies auf Aluminiumoxid-Nanopartikeln bei der Immobilisierung von Technetium“ Bachelorarbeit an der TU Dresden, 10/2020

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11607C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2017 bis 30.06.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 504.649,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Altmaier	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Primäres Ziel des Verbundvorhabens VESPA II ist, das Verständnis der Lösungseigenschaften und der Rückhaltung von mobilen Spalt- und Aktivierungsprodukten mit Fokus auf reduzierende Bedingungen entscheidend zu verbessern. Dabei sollen insbesondere zuverlässigere chemische Eingangsdaten für langzeitanalytische Modellrechnungen für generische Endlagerbedingungen unterschiedlicher Wirtsgesteinsformationen zur Verfügung gestellt werden. Dies umfasst unter anderem das Stoffinventar und den Quellterm für  $^{129}\text{I}$  sowie Löslichkeitsgrenzen und Sorptionskoeffizienten für Selen-, Iod- und Technetiumspezies.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Arbeiten von KIT-INE im Rahmen von VESPA II gliedern sich in folgende Arbeitspakete:

AP1: Chemische Thermodynamik von Technetium(IV).

AP2: Rückhaltung von Radionukliden durch Sekundärphasen im Nahfeld: Rückhaltung von Selen(IV) durch Calcit.

AP3: Rückhaltung von Radionukliden durch Sekundärphasen im Nahfeld: Rückhaltung von Iod durch Fe-Sekundärphasen.

AP4: Freisetzung von  $^{129}\text{I}$  aus der Abfallmatrix.

AP5: Einbindung von Daten und Erkenntnissen in langzeitsicherheitsanalytische Modellrechnungen (erfolgt gemeinsam im Projektverbund).

AP6: Dokumentation.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden von KIT-INE in VESPA II die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- AP1: (i) In das Manuskript zu den Arbeiten im Tc(IV)-SO<sub>4</sub> System wurden neue EXAFS Studien integriert. Eine finale Version des Manuskripts ist für März 2021 geplant.  
(ii) Abschluss der Löslichkeitsexperimente aus der Unter- und Übersättigung mit Tc bei Anwesenheit von Gluconat.  
(iii) Abschluss der XAS-Analysen zur Charakterisierung der Tc-Speziation bei Anwesenheit von Gluconat. Ein Manuskript wird vorbereitet.  
(iv) Abschluss der Löslichkeitsexperimente mit Re für Analogiebetrachtungen zu den Tc-Systemen. Ein Manuskript wird vorbereitet.  
(v) Ansetzen von Experimenten mit Tc bei Anwesenheit von Sulfid.
- AP2: Beendigung der Langzeit-Rekristallisationsexperimente.
- AP3: (i) Sorptionsversuche zur Wechselwirkung zwischen Iodid und Grüner-Rost Festphasen wurden abgeschlossen. Hierbei zeigte sich eine schwache Rückhaltung von Iodid durch bereits vorliegendes Grüner-Rost-Chlorid. XAS-Daten von Sorptionsproben wurden ausgewertet.  
(ii) Sorptionsdaten wurden erfolgreich mit einem Ionenaustauschmodell modelliert. (iii) Experimente zum Effekt der Anwesenheit von Sulfat auf die Rückhaltung von Iodid durch Grüner-Rost-Chlorid wurden begonnen.
- AP4: (i) Weitere Gas- und Lösungsprobenahmen des Auslaugexperimentes mit bestrahltem Kernbrennstoff zur Bestimmung der <sup>129</sup>I-Freisetzung (IRF).  
(ii) Alkalischer Aufschluss von Kernbrennstoff in der abgeschirmten Boxenlinie des INE und Anwendung der entwickelten Separationsmethode für <sup>129</sup>I auf Aufschlusslösungen zur Ermittlung des <sup>129</sup>I Inventars.
- AP5 und AP6: Es wurden keine Arbeiten im Berichtszeitraum durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: (i) Einreichung des Manuskripts (inklusive der EXAFS Daten) zu den Arbeiten im Tc(IV)-SO<sub>4</sub> System. (ii) Einreichung des Manuskripts zu den Arbeiten im Tc-Gluconat System. (iii) Einreichung des Manuskripts zu den Arbeiten mit Re für Analogiebetrachtungen zu den Tc-Systemen. (iv) Abschluss der Löslichkeitsexperimente mit Tc bei Anwesenheit von Sulfid.
- AP2: Charakterisierung von Festphasen und Lösung aus den Langzeit-Rekristallisationsexperimenten.
- AP3: (i) Abschluss aller Sorptionsversuche zur Wechselwirkung zwischen Iodid und Grüner-Rost Festphasen. (ii) Fortsetzung und Abschluss des Schreibens der Dissertation (T. Platte).
- AP4: (i) Abschließende Beprobung des Auslaugexperimentes zum Freisetzungsverhalten von <sup>129</sup>I (IRF). (ii) Weitere Kernbrennstoffprobenaufschlüsse zur <sup>129</sup>I Inventarbestimmung.
- AP5 und AP6: Es sind keine Arbeiten im kommenden Berichtszeitraum geplant. Ggf. Start der Berichtserstellung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11607D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2017 bis 30.06.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 265.296,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Daniels	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

VESPA II baut auf den Erkenntnissen aus dem Vorläuferprojekt VESPA auf, indem offene Fragen zur Rückhaltung von Radionukliden, der chemischen Thermodynamik von Spalt- und Aktivierungsprodukten, und der Einbindung von Daten und Erkenntnissen in die Langzeitsicherheitsanalyse bearbeitet werden. Dabei sollen insbesondere zuverlässigere chemische Eingangsdaten für langzeitanalytische Modellrechnungen für generische Endlagerbedingungen unterschiedlicher Wirtsgesteinsformationen zur Verfügung gestellt werden. Dies umfasst das Stoffinventar und den Quellterm für  $^{129}\text{I}$  sowie Löslichkeitsgrenzen und Sorptionskoeffizienten für Selen-, Iod- und Technetiumspezies.

Innerhalb des Beitrags des IEK-6 zu VESPA II wird die Retention von Iodid an lamellaren Doppelhydroxid-Verbindungen (LDHs) im Detail untersucht. Das langlebige Isotop  $^{129}\text{I}$  spielt in vielen Analysen zur Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern für hochradioaktive Abfälle eine große Rolle. Im Rahmen des vorgeschlagenen Projekts sollen unterschiedliche Rückhalte-mechanismen von Iodid an LDH quantitativ bewertet werden und Daten für Modellrechnungen ermittelt werden. Zusätzlich werden Daten zum Stoffinventar von  $^{129}\text{I}$  in abgebrannten Brennelementen und damit der maximal aus dem Abfall freisetzbaren  $^{129}\text{I}$ -Stoffmenge ermittelt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in 6 Arbeitspakete (AP), die nachfolgend kurz zusammengefasst sind:

AP1:  $^{129}\text{I}$ -Inventar in bestrahltem Kernbrennstoff: Dieses AP beinhaltet eine Auswertung von Literaturdaten, die dann zur Abschätzung der  $^{129}\text{I}$ -Inventare auch generische Abbrandrechnungen für repräsentative Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren (DWR/SWR) und deren Bestrahlungshistorie verwendet werden.

AP2-AP4: sind experimentelle APs, in denen unterschiedliche Rückhalte-mechanismen (Anionenaustausch, Einbau durch Ko-präzipitation und Rückhaltung in kalzinierten LDH-Phasen) von Iodid an LDH untersucht werden sollen. Neben strukturellen Untersuchungen steht die Quantifizierung von thermodynamischen Eigenschaften der untersuchten Phasen im Vordergrund.

AP5: In diesem AP werden die Daten aus den experimentellen APs so aufbereitet, dass sie für Modellrechnungen an die Projektpartner übergeben werden können und letztlich auch der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden.

AP6: Ergebnisdokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2: Im Berichtszeitraum wurden Experimente zur Bestimmung der Löslichkeit der durch Anionenaustausch hergestellten (Mg,Ni)Al-LDH-I Phasen durchgeführt, wobei inaktives Iod ( $^{127}\text{I}$ ) als Analogon für  $^{129}\text{I}$  verwendet wurde. Ein thermodynamisches Modell für die Auswertung der Daten wurde erarbeitet. An ausgewählte Phasen sowie Referenzmaterialien (z. B.  $\text{Mg}_3\text{Al-LDH-CO}_3$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al-LDH-CO}_3$ ) wurden IR-Messungen unter Verwendung eines neu angeschafften IR-Spektrometers durchgeführt, um bisherige Unsicherheiten der IR-spektroskopischen Messungen zu beseitigen.

AP3: Die Methode zur LDH-Herstellung durch Kopräzipitation wurde optimiert. Dabei wurden insb. Ionenstärke, Ausgangskonzentrationen von Ni, Al bzw. Mg, Temperatur und Alterungszeit angepasst. Die zu optimierenden Parameter sind LDH-Kristallinität und Iod-Einbau. Es konnte gezeigt werden, dass die Alterungszeit in allen Fällen eine große Rolle spielt. Eine ausgeprägte LDH-Struktur wurde bereits nach 2 Wochen beobachtet, wobei eine weitere Alterung zur Verschlechterung der LDH-Kristallinität führt. Das weist darauf hin, dass die durch Kopräzipitation hergestellten (Mg,Ni)Al-LDH-I Phasen metastabil sein könnten.

AP4: Bildung und Stabilität der Oxidphasen, die möglicherweise eine vollständige reversible Rekonstruktion der LDH behindern, wurden systematisch untersucht. Die Auswertung der mittels XAS gewonnenen Daten wurde abgeschlossen. Es wurde eine Reihe von kalzinierten LDH-Proben (Kalzinierung bei 500 – 1000 °C) mit unterschiedlichen Ni-Gehalten hergestellt und mittels PXRD untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass infolge Kalzinierung bei hohen Temperaturen ( $T > 800$  °C) zwei Phasen stabilisiert werden: gemischte (Mg,Ni)O-Oxide und eine gemischte (Mg,Ni)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Phase mit Spinellstruktur. Es wurde festgestellt, dass die Oxidphase mit Ni-angereichert ist, während die Spinellphase Mg-reicher ist. Beide Phasen sind Mischkristalle und konnten hinsichtlich ihrer Gitterparameter charakterisiert werden. Diese Phasen sorgen dafür, dass in den durch Rekonstruktion hergestellten LDH-Phasen das  $\text{M}^{\text{II}}/\text{M}^{\text{III}}$  Verhältnis abnimmt. Das Ergebnis stimmt mit den bislang ausgewerteten IR-Daten überein und ist ein Grund für die beobachteten Unterschiede in der Reversibilität des Iod-Einbaus durch Anionenaustausch bzw. Rekonstruktion.

AP6: Zusammenfassung der Auswertung von Löslichkeitsdaten für die durch Anionenaustausch hergestellten (Mg,Ni)Al-LDH-I Phasen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im nächsten Halbjahr soll die weitere Auswertung der Löslichkeitsdaten für die durch Anionenaustausch hergestellten (Mg,Ni)Al-LDH-I Phasen erfolgen. Weitere thermodynamische Daten für die (Mg,Ni)Al-LDH-I Phasen sollen mittels Lösungskalorimetrie bestimmt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11617A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Felder 3.1 + 3.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2017 bis 30.11.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 865.583,78 EUR	<b>Projektleiter:</b> Jobmann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Vorhabens wird ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in Kristallingestein in Deutschland entwickelt. Ein erstes Teilziel ist es, dafür plausible standortunabhängige generische geologische Modelle für unterschiedliche ewG-Typen zu entwickeln. Die darauf basierende weitere Konzeptentwicklung erfordert Kenntnisse sowohl über das Gesteinsverhalten als auch über physikalisch-chemische Prozesse, die innerhalb und außerhalb eines geplanten Endlagers während der zukünftigen Entwicklung ablaufen werden. Ein zweites Teilziel ist daher, einen generischen FEP-Katalog für Endlager in Kristallingesteinen zu entwickeln, auf dessen Basis später eine Szenarientwicklung durchgeführt werden kann. Kernelemente eines Nachweiskonzeptes sind die Nachweise zur Barrierenintegrität und die radiologische Analyse. Die Teilziele in dem Zusammenhang sind die Konzeption und beispielhafte Durchführung von Integritätsanalysen sowohl für die geologische als auch die geotechnischen Barrieren sowie die Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren für die zu betrachtenden ewG-Typen. Zum Nachweis der Integrität werden die in den Sicherheitsanforderungen qualitativ definierten Integritätskriterien soweit quantifiziert, dass ein rechnerischer Nachweis anhand konkreter Zahlenwerte erfolgen kann.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Sicherheits- und Nachweiskonzept im Kristallingestein
- AP2: Geologie deutscher Kristallinkomplexe, Modelle und Datenbasis
- AP3: Erstellung eines generischen FEP-Kataloges für Endlager im Kristallin
- AP4: Konzeption und beispielhafte Durchführung von Integritätsanalysen
- AP5: Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren
- AP6: Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 werden drei generische FEP-Kataloge für Endlager im Kristallin erarbeitet, die sich auf die drei unterschiedlichen Optionen „multipler ewG“, „überlagernder ewG“ und „modifiziertes KBS3-Konzept“ beziehen. Diese drei Kataloge beschränken sich allerdings zunächst auf die Auflistung und Beschreibung der für das jeweilige System als relevant identifizierten FEP, ohne die systeminternen Abhängigkeiten der einzelnen FEP untereinander zu diskutieren. Letzteres ist aber, neben der kompletten Systembeschreibung durch die FEP selber, eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Szenarien. Aus diesem Grund wurde im Berichtszeitraum damit begonnen, speziell für die Option „modifiziertes KBS-3 Konzept“, die Abhängigkeiten der einzelnen FEP eines Systems untereinander zu erarbeiten.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 4 wurden im Berichtszeitraum zunächst die Verschlusskonzepte für die drei Optionen noch einmal signifikant überarbeitet. Verschlussbauwerke werden gemäß § 2 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung unterteilt in „wesentliche“ Barrieren und „weitere“ Barrieren (EndlSiAnfV 2019). Im Rahmen des Verschlusskonzeptes werden den wesentlichen Barrieren „Sicherheitsfunktionen“ und den weiteren Barrieren „Schutzfunktionen“ zugeordnet. Damit diese Sicherheits- oder Schutzfunktionen von den einzelnen Komponenten auch übernommen werden können, müssen jeder Komponente bestimmte Leistungsziele zugeordnet werden. Leistungsziele, die von jeder Komponente erreicht werden müssen, damit sie die ihnen zugeordnete Funktion an der ihnen zugeordneten Position auch erfüllen können.

Ebenfalls überarbeitet wurden die Kriterien für die Nachweisführung zur Integrität des technischen und geotechnischen Barrierensystems. Dies geschah in enger Abstimmung mit dem von der BGE geförderten Projekt RESUS, im Zuge dessen eine Auslegung des Grubengebäudes für die Einlagerungsoptionen im Kristallin durchgeführt wurde.

Beispielhaft wurden numerische Analysen zum Verhalten des Bohrlochverschlusses durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden die Bemessung des Widerlagers für den Bohrlochverschluss durchgeführt und dokumentiert. Hierbei wurde ein Hartsteinwiderlager angenommen, um die Verwendung eines Materials mit Zementphasen zu vermeiden und damit die Langzeitstabilität zu gewährleisten. Mittels eines lokalen numerischen Modells, mithilfe des finiten Differenzen Programms FLAC3D, erfolgte die Bemessung unter Berücksichtigung der Designanforderungen am Verschlusskonzept. Hierfür wurde als erster Schritt ein globales Modell vom Nahfeldbereich erstellt, um die thermischen Auswirkungen über die Zeit im Bereich des Bohrlochverschlusses aufgrund der Wärmeentwicklung der Abfälle zu ermitteln. Als zusätzliche Einwirkung für die Bemessung des Widerlagers wurde die zeitabhängige Druckentwicklung im Dichtelement aus bereits vorhandenen mechanisch-hydraulisch gekoppelten Berechnungen mit TOUGH-2 berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Anwendung eines Widerlagers aus Hartgestein die Leistungsziele und die Schutzfunktion des Bohrlochwiderlagers zu erfüllen sind.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Vollständige Beschreibung des Nachweiskonzeptes für alle drei Optionen
- Beispielhafte Nachweisführungen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11617B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2017 bis 30.11.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 870.640,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Wolf	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Vorhabens wird ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in Kristallingestein in Deutschland entwickelt. Ein erstes Teilziel ist es, dafür plausible standortunabhängige generische geologische Modelle für unterschiedliche ewG-Typen zu entwickeln. Die darauf basierende weitere Konzeptentwicklung erfordert Kenntnisse sowohl über das Gesteinsverhalten als auch über physikalisch-chemische Prozesse, die innerhalb und außerhalb eines geplanten Endlagers während der zukünftigen Entwicklung ablaufen werden. Ein zweites Teilziel ist daher, einen generischen FEP-Katalog für Endlager in Kristallingesteinen zu entwickeln, auf dessen Basis später eine Szenarienentwicklung durchgeführt werden kann. Kernelemente eines Nachweiskonzeptes sind die Nachweise zur Barrierenintegrität und die radiologische Analyse. Die Teilziele in dem Zusammenhang sind die Konzeption und beispielhafte Durchführung von Integritätsanalysen sowohl für die geologische als auch die geotechnischen Barrieren sowie die Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren für die zu betrachtenden ewG-Typen. Zum Nachweis der Integrität werden die in den Sicherheitsanforderungen qualitativ definierten Integritätskriterien soweit quantifiziert, dass ein rechnerischer Nachweis anhand konkreter Zahlenwerte erfolgen kann.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Sicherheits- und Nachweiskonzept im Kristallingestein
- AP2: Geologie deutscher Kristallinkomplexe, Modelle und Datenbasis
- AP3: Erstellung eines generischen FEP-Kataloges für Endlager im Kristallin
- AP4: Konzeption und beispielhafte Durchführung von Integritätsanalysen
- AP5: Berechnung radiologischer Sicherheitsindikatoren
- AP6: Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3: Erarbeitung der Abhängigkeitskonfiguration der FEP für das modifizierte KBS3-Konzept. Gemeinsame Besprechung der FEP-Abhängigkeiten mit BGR und BGETEC.
- AP4: Ableitung von Maßstäben zur Bewertung, wann eine erhebliche Beeinträchtigung der Barrierewirkung durch Änderung chemischer Verhältnisse zu erwarten ist. Erarbeitung eines entsprechenden Nachweiskonzeptes.
- AP5: Weiterführung der Arbeiten zur Nachweisführung am Rande des ewG für die ewG-Konfiguration Typ „überlagernder ewG“ und das modifizierte KBS-3-Konzept. Berechnung mehrerer Sicherheits- und Performanceindikatoren, darunter die in den EndlSi-AnfV definierten Indikatoren zum Einschluss von Radionukliden. Erstellung einer internen Dokumentation für den Abschlussbericht.  
Fortführung der Strömungs- und Transportrechnungen für das von der BGR entwickelte geologische Modell für die ewG-Konfiguration Typ „überlagernder ewG“ mit dem Grundwasserströmungs- und Transportmodellen FEFLOW und d<sup>3</sup>f<sup>++</sup>.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3: Vollständige Erarbeitung der Abhängigkeitskonfiguration der FEP für das modifizierte KBS3-Konzept. Gemeinsame Besprechung der FEP-Abhängigkeiten mit BGR und BGETEC.
- AP4: Erweiterung des Nachweiskonzeptes durch Ableitung von Maßstäben zur Bewertung, wann eine erhebliche Beeinträchtigung der Barrierewirkung durch Änderung chemischer Verhältnisse zu erwarten ist.
- AP5: Fertigstellung der Strömungs- und Transportrechnungen für das von der BGR entwickelte geologische Modell für die ewG-Konfiguration Typ „überlagernder ewG“ mit dem Grundwasserströmungs- und Transportmodellen FEFLOW und d<sup>3</sup>f<sup>++</sup> und Auswertung der Ergebnisse.
- AP6: Beginn mit der Dokumentation der Ergebnisse aus dem Vorhaben CHRISTA-II.

Die Arbeiten zu den AP1, 2 und 4 sind abgeschlossen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11627</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2017 bis 31.10.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.308.959,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Zhang	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben zur Untersuchung der Eignung arteigener Versatz-/Verschlussmaterialien für HAW-Endlager im Tongestein hat das Ziel, geotechnische Eigenschaften von Ausbruchsmaterial aus dem Opalinuston (ist dem in einem deutschen Endlager zu erwartenden Wirtsgestein am ähnlichsten - Standortmodell SÜD) und des Gemisches mit Bentonitzusatz experimentell zu bestimmen und die Eignung als Versatz- und Verschlussmaterialien zu analysieren. Dadurch soll ein verbessertes Verständnis für das Materialverhalten erreicht und eine Grundlage für eine belastbare Prognose der Langzeitprozesse im Versatz- und Verschlussystem mit Blick auf die langfristige Abdichtung eines Endlagers in einer Tonsteinformation geschaffen werden. Damit leistet das Projekt einen Beitrag zur Absicherung der Grundlagen für die Langzeitsicherheitsanalyse von HAW-Endlagern in Deutschland.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Laboruntersuchungen werden am Ausbruchmaterial aus der Auffahrung einer neuen Strecke in der sandigen Fazies des Opalinustons im Untertagelabor Mont-Terri und am Gemisch mit Bentonitzusatz in drei Arbeitspaketen durchgeführt:

- AP1: Ermittlung der geotechnischen Eigenschaften wie z. B. Kompaktion und Permeabilität des Ausbruchmaterials zur langfristigen Abdichtung der Endlager Hohlräume
- AP2: Ermittlung der geotechnischen Eigenschaften des kompaktierten Gemisches aus dem Ausbruchtonstein mit Bentonitzusatz zur Prüfung der Eignung für den Verschluss der Strecken und Schächte
- AP3: Ermittlung der geotechnischen Eigenschaften des Gemisches aus dem Ausbruchtonstein mit Bentonitzusatz zur Prüfung der Eignung als HAW-Buffermaterial bei hohen Temperaturen in Form von hochverdichteten Formsteinen für Auflager von Abfallbehältern und in Form von Granulat zur Verfüllung des Resthohlraums
- AP4: Untersuchung des Gastransportes in geschädigtem Tonstein zur Beteiligung am EU-Projekt EURAD im WP6-GAS

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Versuche zur Wasseraufnahmefähigkeiten vom Bentonit, Ausbruchtonstein und Tonstein-Bentonit Gemisch (7/3) sind mit insgesamt 30 Proben in lockerem und kompaktiertem Zustand erfolgreich beendet. Bei unterschiedlichen Luftfeuchten von 30-100 % wurden Wassergehalte der Proben mit der Zeit bis zum Gleichgewicht gemessen. Aufgrund des hohen Gehalts an Montmorillonit zeigt der Bentonit eine höchste Wasseraufnahmefähigkeit. Im Gegensatz dazu ist die Wasseraufnahmekapazität des Tonsteins begrenzt. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % kann der Bentonit einen hohen Wassergehalt von 48 % erreichen. Dieser Wert ist 3 bis 9-fach höher als die jeweiligen Wassergehalte des Tonstein-Bentonit Gemisch (7/3) und des Tonsteins.

Zur Bestimmung der mechanisch-hydraulischen Eigenschaften der Ausbruchtonstein-Bentonit-Mischungen als Verschlussmaterial wurden vier Proben untersucht: (1) kompaktierte Ausbruchtonstein-Blöcken; (2) Tonstein-Bentonit-Blöcken (7/3); (3) lockeres Bentonit-Pellets/Pulver-Gemisch (8/2) und (4) lockeres Tonstein-Bentonit-Gemisch (7/3). Die Proben wurden in Oedometerzellen unter stufenweise Belastungserhöhung von bis zum 5 MPa über eine langezeit von 1.5 Jahre kompaktiert. Dabei wurden die Volumenänderung, Porosität und Wasserpermeabilität im ersten Jahr gemessen. Anschließend wurden Gassperrdrücke und Gaspermeabilitäten der wassergesättigten Proben bei einem Manteldruck von 5 MPa bestimmt. Die Versuche sind erfolgreich beendet und ausgewertet worden.

GRS ist beteiligt am EU-Projekt EURAD mit Laboruntersuchungen zur Ermittlung des Gasflussverhaltens von geschädigtem Tonstein. Es wurde geplant, Gasströmung in Rissen in Tonkernen vor und nach Wassersättigung unter unterschiedlichen Belastungen zu bestimmen. Im August 2020 wurde ein großer Bohrkern von 300 mm Durchmesser und 300 mm Länge aus dem Untertagelabor Mont-Terri gewonnen und davon eine zylindrische Versuchsprobe von  $D = 270$  mm und  $L = 200$  mm mit einem Zentralbohrloch von 20 mm hergestellt. Leider konnte der geplante Versuch infolge eines Fehlers des Steuerungssystems der Prüfmaschine nicht planmäßig gestartet werden. Zur Lösung des Problems wurde die notwendige Reparatur bei der Hersteller Firma MTS beauftragt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Starten der Versuche zur Bestimmung der Temperatureinflüsse auf die Eigenschaften des Bentonits und Tonstein-Bentonit-Gemischs (7/3)
- Starten des Gastests mit großen Tonkernen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11637A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt A: 3D-Spannungsmodell und Aufskalierung		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2018 bis 31.12.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 203.400,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Henk	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das tektonische Spannungsfeld in der Erdkruste wirkt sich auf eine Vielzahl der Kriterien zur Standortauswahl für die Entsorgung radioaktiver Abfälle aus. Eine verlässliche Prognose im Vorfeld von Erkundungsmaßnahmen wird allerdings dadurch erschwert, dass das Spannungsfeld in seiner Orientierung und Magnitude nicht einheitlich ist. Vielmehr können in Abhängigkeit vom Untergroundaufbau (Lithologien, Störungen) lokal deutliche Abweichungen von der überregional bekannten Spannungsverteilung auftreten. Um ein prozessbasiertes Verständnis dieser räumlichen Variabilität zu erreichen, wird ein geomechanisch-numerisches 3D-Spannungsmodell für Deutschland (Dimensionen ca. 1200 x 900 x 80 km<sup>3</sup>) erstellt. Dieses Modell wird an punktuell gemessenen Spannungsdaten kalibriert und ermöglicht auf Basis kontinuumsmechanischer Ansätze Prognosen für Bereiche ohne Spannungsdaten und die Ableitung aller sechs Komponenten des Spannungstensors. Darüber hinaus werden Modellierungswerkzeuge für räumliche Skalen übergreifende Modelle entwickelt. So wird ein konsistenter Spannungsübertrag zwischen dem Deutschland-Modell und ca. drei Größenordnungen kleineren Teilmodellen ermöglicht. Alle Arbeiten liefern die erforderlichen Grundlagen und Modellierungswerkzeuge für zukünftige geomechanische Standortmodelle.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundprojekt gliedert sich in zwei Arbeitspakete (APs):

In AP1 (Teilprojekt A) wird ein großräumiges geomechanisch-numerisches 3D-Spannungsmodell für Deutschland entwickelt, das an allen aktuell verfügbaren Spannungsdaten kalibriert wird.

In AP2 (Teilprojekt B) werden Modellierungstechniken zur Wahl geeigneter, skalenabhängiger Gesteins- bzw. Gebirgsparameter sowie Konzepte für die für ein entsprechendes Modellvolumen erforderlichen repräsentativen Kalibrierungsdaten untersucht.

Weitere Arbeitsziele sind die Weiterentwicklung der Modellierungswerkzeuge, welche die Grundlagen für eine zukünftige Standortcharakterisierung liefern und einen zukünftigen Standortvergleich bezüglich des Spannungsfeldes nach einheitlichen Kriterien ermöglicht und die Erstellung einer Datenbank zu Spannungsmagnituden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im zweiten Halbjahr 2020 konzentrierten sich die Projektarbeiten auf zwei Schwerpunkte. Diese waren die Vorbereitung einer Publikation zu den bisherigen Ergebnissen eines noch relativ grob aufgelösten Spannungsmodells für Deutschland sowie die Erstellung eines stratigraphisch höher aufgelösten Modells.

Die Ergebnisse des gröber aufgelösten Modells wurden in einem Manuskript zusammengefasst. Inhaltlich liegt der Fokus der Publikation auf der Erstellung der Modellgeometrie und der Kalibrierung des Modells an gemessenen Spannungsdaten. Dieses Manuskript wurde im Dezember 2020 von dem Journal ‚Solid Earth‘ zum Review angenommen und ist bereits als Preprint verfügbar (<https://se.copernicus.org/preprints/se-2020-199/>).

In den bisherigen Modellen war das sedimentäre Auflager des Basements lediglich als eine homogene Einheit repräsentiert, was noch eine starke Vereinfachung der in Abhängigkeit von der Lithologie häufig sehr unterschiedlichen mechanischen Gesteinseigenschaften darstellt. Das neu erstellte Modell unterteilt die bisherige Sedimenteinheit in bis zu 14 Einheiten, denen jeweils individuelle Gesteinseigenschaften zugeordnet werden können. Die höhere stratigraphische Auflösung wurde in der Kernregion des Modells umgesetzt, da nicht nur der Fokus der Studie auf Deutschland liegt, sondern hier auch ausreichend Daten zu den Materialeigenschaften und zur Kalibrierung der Spannungsmagnituden zur Verfügung stehen. Um die feinere stratigraphische Unterteilung auch numerisch handhaben zu können, wurde die vertikale und laterale Auflösung des diskretisierten Modells (Rechengitter) deutlich erhöht. Die laterale Auflösung wurde von 6 km x 6 km auf 4 km x 4 km verfeinert, die vertikale Auflösung in den oberen 10 km wurde von 800 m auf 400 m reduziert. Somit hat sich die Elementanzahl des Modells von 1,3 auf 3,5 Millionen Elemente vergrößert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im ersten Halbjahr des Jahres 2021 wird sich die Arbeit auf die Kalibrierung des verfeinerten Modells mit den stratigraphisch besser aufgelösten Sedimentschichten fokussieren. Die Kalibrierung erfolgt auf der Basis bereits publizierter Daten zu Spannungsmagnituden und Spannungsorientierungen. Dazu sollen u. a. auch die Kapazitäten des Lichtenberg-Hochleistungsrechner der TU Darmstadt genutzt werden. Darüber hinaus ist auch eine erste Einbeziehung von Störungen in die Modellierungen in der Form geplant, dass der berechnete Spannungstensor zur Analyse der „slip- und dilatation tendency“ auf den Störungsflächen verwandt wird.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

#### Publikation

Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K. et al. An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions. *Geotherm Energy* 8, 25 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00178-5>

#### Preprint/im Review

Ahlers, S., Henk, A., Hergert, T., Reiter, K., Müller, B., Röckel, L., Heidbach, O., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., and Anikiev, D.: 3D crustal stress state of Western Central Europe according to a data-calibrated geomechanical model – first results, *Solid Earth Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/se-2020-199>, in review, 2020

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, 14473 Potsdam		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11637B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt B: Multiskalenansatz		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2018 bis 31.12.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 228.586,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Heidbach	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das tektonische Spannungsfeld in der Erdkruste wirkt sich auf eine Vielzahl der Kriterien zur Standortauswahl für die Entsorgung radioaktiver Abfälle aus. Eine verlässliche Prognose im Vorfeld von Erkundungsmaßnahmen wird allerdings dadurch erschwert, dass das Spannungsfeld in seiner Orientierung und Magnitude nicht einheitlich ist. Vielmehr können in Abhängigkeit vom Untergroundaufbau (Lithologien, Störungen) lokal deutliche Abweichungen von der überregional bekannten Spannungsverteilung auftreten. Um ein prozessbasiertes Verständnis dieser räumlichen Variabilität zu erreichen, wird ein geomechanisch-numerisches 3D-Spannungsmodell für Deutschland (Dimensionen ca. 1200 x 900 x 80 km<sup>3</sup>) erstellt. Dieses Modell wird an punktuell gemessenen Spannungsdaten kalibriert und ermöglicht auf Basis kontinuumsmechanischer Ansätze Prognosen für Bereiche ohne Spannungsdaten und die Ableitung aller sechs Komponenten des Spannungstensors. Darüber hinaus werden Modellierungswerkzeuge für räumliche Skalen übergreifende Modelle entwickelt. So wird ein konsistenter Spannungsübertrag zwischen dem Deutschland-Modell und ca. drei Größenordnungen kleineren Teilmodellen ermöglicht. Alle Arbeiten liefern die erforderlichen Grundlagen und Modellierungswerkzeuge für zukünftige geomechanische Standortmodelle.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundprojekt gliedert sich in zwei Arbeitspakete (APs):

In AP1 (Teilprojekt A) wird ein großräumiges geomechanisch-numerischen 3D-Spannungsmodells für Deutschland entwickelt, das an allen aktuell verfügbaren, tatsächlich gemessenen Spannungswerten kalibriert wird.

In AP2 (Teilprojekt B) werden Modellierungstechniken zur Wahl geeigneter, skalenabhängiger Gesteins- bzw. Gebirgsparameter sowie Konzepte für die für ein entsprechendes Modellvolumen erforderlichen repräsentativen Kalibrierungsdaten untersucht.

Weitere Arbeitsziele sind die Weiterentwicklung der Modellierungswerkzeuge, welche die Grundlagen für eine zukünftige Standortcharakterisierung liefern und einen zukünftigen Standortvergleich bezüglich des Spannungsfeldes nach einheitlichen Kriterien ermöglicht und die Erstellung einer Datenbank zu Spannungsmagnituden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Frau Morawietz musste eine weitere Überarbeitung des eingereichten Manuskriptes zur Spannungsmagnitudendaten Deutschlands und angrenzender Gebiete vorlegen, da es mit den internationalen Gutachtern insbesondere beim Quality Ranking Diskussions- und Verbesserungsbedarf gab. Diese zusätzliche Iteration konnte jedoch erfolgreich abgeschlossen werden und der mit 34 Druckseiten umfangreiche Artikel wurde Anfang Oktober 2020 veröffentlicht (Morawietz, 2020a). Parallel dazu erfolgte eine technische Datenveröffentlichung (Morawietz et al., 2020b). Die Überführung dieser Daten in die neue Datenbankstruktur des World Stress Map (WSM) Projektes wurde ebenfalls technisch abgeschlossen, konnte jedoch noch nicht vollzogen werden, da die abschließenden Programmierarbeiten an der neuen PostgreSQL Datenbankstruktur der WSM wg. der Corona-Pandemie nicht abgeschlossen werden konnten.

Weiterhin wurde das generische geomechanisch-numerische 3D-Modell, mit dem der Multi-Skalenansatz quantitativ getestet wird, in einer umfangreichen Parameterstudie gerechnet. Mit diesem Ansatz wurde untersucht, wie aus einem großräumigen Modell das initiale Spannungsfeld für kleinräumige regionale bzw. lokale Modelle formal korrekt abgeleitet werden können. Insbesondere wurde getestet, unter welchen Bedingungen synthetische Spannungsmagnitudendaten aus großräumigen Modellen für die Kalibrierung von kleinräumigen Modellen verwendet werden können. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz der Verwendung synthetischer Spannungsmagnitudendaten robust ist im Gegensatz zum Übertrag von Verschiebungsrandbedingungen, die unter Umständen zu großen Abweichungen führen.

Ebenfalls konnten trotz der besonderen Umstände die ersten Decay Days vom 2. - 4. September 2020 am GFZ Potsdam durchgeführt werden in einem kombinierten Live-Online-Modus. Ziel der Veranstaltung ist die Etablierung einer internationalen Konferenz-Serie für junge Postdocs und PhD-Studierende, um ein Netzwerk für den Nachwuchs der Endlagerstandortforschung zu etablieren ([www.decay-days.eu](http://www.decay-days.eu)). Insbesondere soll die kommende Generation der Geo- und IngenieurswissenschaftlerInnen auf europäischer Ebene verknüpft werden. Die Konferenz war erfolgreich und eine weitere ist für 2021 geplant.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Für das erste Halbjahr 2021 sind folgende Arbeitsschwerpunkte geplant:

- Erweiterung der Datenbank, da weitere Daten jetzt verfügbar sind bzw. das neue Geologiedatengesetz uns Zugang zu weiteren Daten erlaubt.
- Einbindung der Datenbank in die neue PostgreSQL Datenbank des WSM Projektes.
- Weitere Analyse und Anfertigung eines technischen Berichtes zu den Arbeiten der generischen geomechanisch-numerischen Modelle zum „multi-scale“ Ansatz. Eventuell wird hierzu das Format eines Technischen Berichts in der WSM Serie mit DOI verwendet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Morawietz, S., O. Heidbach, K. Reiter, M. O. Ziegler, M. Rajabi, G. Zimmerman, B. Müller, and M. Tingay (2020a): An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions, Geothermal Energy, doi:10.1186/s40517-020-00178-5

Morawietz, A., Ziegler, M., Reiter, K. (2020b): Stress magnitude database for Germany and adjacent regions, GFZ Data Services, <https://doi.org/10.5880/WSM.2020.004>

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11637C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt C: Geomechanik von Sedimentbecken		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2018 bis 31.12.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 175.974,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schilling	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das tektonische Spannungsfeld in der Erdkruste wirkt sich auf eine Vielzahl der Kriterien zur Standortauswahl für die Entsorgung radioaktiver Abfälle aus. Eine verlässliche Prognose im Vorfeld von Erkundungsmaßnahmen wird allerdings dadurch erschwert, dass das Spannungsfeld in seiner Orientierung und Magnitude nicht einheitlich ist. Vielmehr können in Abhängigkeit vom Untergroundaufbau (Lithologien, Störungen) lokal deutliche Abweichungen von der überregional bekannten Spannungsverteilung auftreten. Um ein prozessbasiertes Verständnis dieser räumlichen Variabilität zu erreichen, wird ein geomechanisch-numerisches 3D-Spannungsmodell für Deutschland (Dimensionen ca. 1200 x 900 x 80 km<sup>3</sup>) erstellt. Dieses Modell wird an punktuell gemessenen Spannungsdaten kalibriert und ermöglicht auf Basis kontinuumsmechanischer Ansätze Prognosen für Bereiche ohne Spannungsdaten und die Ableitung aller sechs Komponenten des Spannungstensors. Darüber hinaus werden Modellierungswerkzeuge für räumliche Skalen übergreifende Modelle entwickelt. So wird ein konsistenter Spannungsübertrag zwischen dem Deutschland-Modell und ca. drei Größenordnungen kleineren Teilmodellen ermöglicht. Alle Arbeiten liefern die erforderlichen Grundlagen und Modellierungswerkzeuge für zukünftige geomechanische Standortmodelle.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundprojekt gliedert sich in zwei Arbeitspakete (APs):

In AP1 (Teilprojekt A) wird ein großräumiges geomechanisch-numerisches 3D-Spannungsmodell für Deutschland entwickelt, das an allen aktuell verfügbaren Spannungsdaten kalibriert wird.

In AP2 (Teilprojekt B) werden Modellierungstechniken zur Wahl geeigneter, skalenabhängiger Gesteins- bzw. Gebirgsparameter sowie Konzepte für die für ein entsprechendes Modellvolumen erforderlichen repräsentativen Kalibrierungsdaten untersucht.

Weitere Arbeitsziele sind die Weiterentwicklung der Modellierungswerkzeuge, welche die Grundlagen für eine zukünftige Standortcharakterisierung liefern und einen zukünftigen Standortvergleich bezüglich des Spannungsfeldes nach einheitlichen Kriterien ermöglicht und die Erstellung einer Datenbank zu Spannungsmagnituden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bisher wurde untersucht, wie das Deutschland-Modell mit verfügbaren geomechanischen Parametern so parametrisiert werden kann, dass möglichst geringe Abweichungen zu vorliegenden Spannungsmesswerten resultieren. Aufgrund der limitierten Auflösung des Modells und fehlender Materialparameter sind solche Differenzen unter Beibehaltung der Verschiebungsrandbedingungen nicht zu vermeiden, da in vielen Bereichen die im Modell verwendeten geomechanischen Parameter nicht mit den in der Natur vorliegenden übereinstimmen.

Da die Zahl der Spannungsmesswerte insgesamt sehr gering ist, sollen jedoch auch solche Spannungsmesswerte für die Kalibrierung oder Validierung des Modells genutzt werden können, für die aufgrund der verwendeten geomechanischen Parameter eine Abweichung zwischen den Spannungsmagnituden im Modell und in der Natur zu erwarten ist. Daher lag ein Schwerpunkt im Berichtszeitraum auf der Untersuchung, wie diese Abweichungen qualitativ und quantitativ abgeschätzt werden können. Hierzu wurde das bereits verwendete generische Modell genutzt, das durch das GFZ zur Verfügung gestellt wurde. Bei den Materialparametern stand der Einfluss des Elastizitätsmoduls im Fokus.

Das Modell wurde zunächst generisch parametrisiert und die Spannungsmagnituden ermittelt. Im Anschluss wurden im Modell zwei geologische Untereinheiten lokal durch die Verwendung einheitlicher geomechanisch relevanter Parameter zusammengefasst. Die in diesem vereinheitlichten Modell ermittelten Spannungsmagnituden wurden im Anschluss mit den Spannungen verglichen, die dem Original-Modell generiert wurden. Zur Vereinheitlichung der Schichten wurde das nach Mächtigkeit der Untereinheiten gewichtete Mittel des E-Moduls verwendet. Dieser Vorgang wurde für unterschiedliche Einflussfaktoren durchgeführt. Bei diesen handelt es sich, neben den E-Modulen der beiden zusammenzufassenden Schichten und deren jeweilige Mächtigkeiten, um die Ausdehnung des Modells in X-, Y- und Z-Richtung und um die aufgegebenen Verschiebungsrandbedingungen. Im Ergebnis wurden lineare Zusammenhänge zwischen den resultierenden Spannungsdifferenzen zwischen vereinfachtem und unvereinfachtem Modell und den getesteten Einflussfaktoren abgeleitet. Mithilfe der linearen Zusammenhänge und der Einflussfaktoren kann die Größenordnung der Abweichung der Spannungsmagnituden zwischen einem Modell mit vereinheitlichten Schichten und einem Modell ohne Vereinheitlichung abgeschätzt werden.

Einschränkend muss gesagt werden, dass diese Untersuchung nicht verallgemeinert werden darf, da sie sich auf linear-elastische, isotrope Modelle ohne Diskontinuitäten bezieht. Da dies jedoch auf das Deutschlandmodell zutrifft, können die ermittelten Zusammenhänge hier zur Abschätzung der Spannungsdifferenzen genutzt werden. Die linearen Zusammenhänge wurden sowohl für die Magnitude der minimalen als auch der maximalen Horizontalspannung ermittelt und in einem Matlab-Skript implementiert. Dieses kann auch anderen Nutzergruppen zur Verfügung gestellt werden.

Im Deutschlandmodell werden keine Störungen in die Modellgeometrie implementiert. Um dennoch Aussagen über die Wahrscheinlichkeit der Störungsreaktivierung treffen zu können, soll für ausgewählte Störungen die Slip Tendency berechnet werden. Hierzu werden zunächst die 3D-Störungsgeometrien aus dem lateralen Störungsverlauf und vertikalen Profilschnitten erstellt. Erste Störungsgeometrien wurden erstellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Erstellung von Slip Tendency Karten basierend auf im Projekt zusammengestellten Störungsdaten und dem derzeitigen Stand des Deutschland-Modells
- Verfeinerung des Sedimentpakets im Deutschland-Modell

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Geplante Poster und Vorträge bei Konferenzen etc. mussten Corona bedingt abgesagt werden.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11647</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2018 bis 30.06.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.610.525,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Noseck	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Vorhabens werden die wissenschaftlichen Ergebnisse von experimentellen und theoretischen FuE-Vorhaben im Hinblick auf ihre Berücksichtigung in Modellvorstellungen und Modelldaten für Langzeitsicherheitsanalysen ausgewertet. Beantragte und laufende Projekte werden hinsichtlich ihrer Relevanz für die Bewertung der Langzeitsicherheit und die Verwendung in einem Safety Case überprüft.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

TA1: Bearbeitung grundlegender Aspekte

- Verfolgung und Bewertung internationaler Entwicklungen zu offenen Fragen bei einem Safety Case und Einbringung nationaler Interessen in internationale Aktivitäten, insbesondere durch Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen der OECD/NEA.
- Weiterentwicklung von Strategien und methodischen Vorgehensweisen in der Langzeitsicherheitsanalyse bzw. für den Safety Case.
- Diskussion von eigenen und externen Ergebnissen in nationalen Diskussionsforen zur Erarbeitung gemeinsamer Stellungnahmen und Vorgehensweisen zu ausgewählten Themen der Endlagerung in Deutschland.
- Auswertung neuer wissenschaftlicher Ergebnisse und Aufbereitung zur Verwendung in Instrumentarien für Langzeitsicherheitsanalysen sowie Identifizierung offener Fragen und Initiierung neuer FuE-Projekte.

TA2: Bearbeitung von Schwerpunktthemen

- Vergleich der Ansätze und Herangehensweisen verschiedener Länder zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern und Weiterentwicklung der eigenen Ansätze. Schwerpunkte sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen sowie die Erstellung eines internationalen FEP-Katalogs für Endlager in Salzformationen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

TA1:

- Teilnahme an einem Treffen der IGSC Core Group. Teilnahme an zwei Bureau Meetings der IDKM Gruppe der NEA und einem Treffen der Expert Group on Archiving (EGAR). Teilnahme am Kick-Off Meeting der EGAR und Leitung der Task Group Set of Essential Records. Fertigstellung des Programm of work der EGAR.
- Teilnahme am Online-Meeting der Task Force on EBS.

- Die Portierung einer einfachen, isothermen Version des in VIPER implementierten Aufsättigungsmodells nach COMSOL wurde erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse wurden auf der COMSOL2020-Konferenz vorgestellt.
- Für die Machbarkeitsstudie zur Visualisierung von Einfriervorgängen in Klüften wurde ein Versuchsaufbau konstruiert und gedruckt. Ein erster Test wurde vorbereitet. Mit der Umsetzung der entsprechenden Erhaltungsgleichungen in COMSOL für eine begleitende Modellierung wurde begonnen.
- Zuordnung von Analoga-Studien zu ausgewählten FEP für Endlagerkonzepte in Kristallingestein auf Basis der Arbeiten im Vorhaben CHRISTA 2.
- Finalisierung des CRC Program of Work 2021–2022. Fortführung der Planung des 4. Crystalline Club Plenary Meetings (CRC-4) im Juni 2021 in Deutschland (alternativ online). Erstellung des End of Term Reports. Planung eines Webinars „Research methods and modern measuring equipment used for site and rock characterization“.

TA2:

- Weiterführung der Analyse von Modellsystemen anderer Länder im Rahmen der gemeinsamen Aktivität zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse (JOSA). Anwendung weiterer Methoden (RS-HDMR, BSPCE, PAWN) auf verschiedene Modellsysteme aus mehreren Ländern. Diskussion der Ergebnisse in internationaler Kooperation sowie Dokumentation der bisherigen Ergebnisse in Form eines Zwischenberichts. Durchführung mehrerer virtueller Abstimmungsgespräche mit den Partnern.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

TA 1:

- Teilnahme an den kommenden Sitzungen des RWMC, der IGSC Core Group und dem Jahrestreffen der IGSC sowie Treffen zu den IDKM und EGAR Arbeitsgruppen. Leitung und Koordination der Arbeiten zum Set of Essential Records in EGAR.
- Abschlussbericht zu Analoga-Studien für Endlager in Kristallingestein.
- Planung und Durchführung des Webinars im ersten Quartal 2021 und des CRC-4 Meetings 2021 in Deutschland (ggf. online). Fertigstellung des CRC Status Reports.
- Durchführung der Machbarkeitstests zu Gefriervorgängen in Klüften. Erstellung eines COMSOL-Modells.
- Durchführung weiterer Arbeiten zur Biosphärenmodellierung.

TA2:

- Gemeinsame Aktivität zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse (JOSA): Fertigstellung des Zwischenberichts, und Durchführung weiterer Analysen komplexerer Modellsysteme aus anderen Ländern.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Freeze, G., Sevougian, D.S., Kuhlman, K., Gross, M., Wolf, J., Buhmann, D., Bartol, J., Leigh, C., Mönig, J. (2020): Generic FEPs Catalogue and Salt Knowledge Archive. SANDIA REPORT SAND2020-13186, Albuquerque, New Mexico

Kröhn, M., Fromme, L.: An Alternative Equation-Based Model in COMSOL Multiphysics® for Bentonite Re-saturation. COMSOL Conference 2020 (online), 2020

Paper: [https://cn.comsol.com/paper/download/856211/Paper\\_Kr%C3%B6hn.pdf](https://cn.comsol.com/paper/download/856211/Paper_Kr%C3%B6hn.pdf)

Poster: [https://cn.comsol.com/paper/download/856201/Europe\\_2020\\_Poster\\_GRS.pptx](https://cn.comsol.com/paper/download/856201/Europe_2020_Poster_GRS.pptx)

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11658A</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt A			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2018 bis 30.04.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 466.700,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Rübel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Um die im Rahmen von ANSICHT-I entwickelte Nachweismethodik zu prüfen, sollen im Rahmen von ANSICHT-II noch ausstehende Einzelnachweise demonstrativ dargestellt und damit die Nachweisführung illustriert werden. Offene Fragen im Nachweissystem, die zur einwandfreien Nachweisführung geklärt werden müssen, sollen identifiziert und klar dargestellt werden. Ziel ist es, durch die Gesamtschau der Einzelnachweise, die in ANSICHT-I entwickelte Nachweismethodik zu evaluieren, ggf. Schwachstellen aufzuzeigen und Verbesserungsansätze zu liefern. Darüber hinaus wird diese Betrachtung aufzeigen, welche Daten, im Rahmen einer Standorterkundung, zielgerichtet erhoben werden müssen, damit die Nachweise Integrität der geologischen Barriere, Integrität der geotechnischen Barrieren und Radiologischer Nachweis, in geeigneter Weise geführt werden können.

Die Bearbeitung wird gemeinsam durch BGR, GRS und BGE TECHNOLOGY durchgeführt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Darstellung und Evaluierung des Integritätsnachweises für die geologische Barriere
- AP2: Darstellung und Evaluierung der Integritätsnachweise für das geotechnische Barriersystem
- AP3: Darstellung des radiologischen Nachweises
- AP4: Berichtswesen

GRS ist federführend für das Arbeitspaket 3. Dieses gliedert sich in die Unteraufgaben:

- AP3.1: 3D-Radionuklid-Transportrechnungen mit d<sup>3f++</sup>
- AP3.2: Integrierte 1D-Radionuklid-Transportrechnungen mit CLAYPOS
- AP3.3: Integrierte Radionuklid-Transportrechnungen mit REPOTREND
- AP3.4: Rechnungen zum Radionuklidtransport in der Gasphase mit TOUGH2
- AP3.5: Bewertung

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3.1: Der Unterauftragnehmer TechSim hat begonnen, die Schnittstelle von  $d^3f++$  zu RepoTREND zu implementieren. Große Teile der geplanten Funktionen wurden bereits umgesetzt und sind derzeit in der Testphase. Dazu gibt es regelmäßige Kontakte zu TechSim. Parallel dazu wurden weitere Recherchen zu den im Modell zu berücksichtigenden Prozessen, den zu verwendenden Parametern und den abzubildenden Geometrien (Endlagergebäude) durchgeführt. Die Ergebnisse werden nach und nach in das  $d^3f++$ -Modell übernommen.
- AP3.2: Es wurden probabilistische langzeitsicherheitsanalytische Rechnungen mit dem Programmpaket RepoTREND durchgeführt. In der Unsicherheitsanalyse wurden 2.000 Rechenläufe durchgeführt und 286 Modellparameter variiert. Die Ungewissheit des maximalen Indikatorwerts gegenüber dem Basisfall beträgt etwa eine Größenordnung im absoluten Maximum, aber vier Größenordnungen bezüglich des Maximums im Nachweiszeitraum. Die Sensitivitätsanalyse ergibt, dass nur der Diffusionskoeffizient im Tongestein und die Transportdistanz im Tongestein laut der entsprechenden Auswertung einen signifikanten Einfluss auf das Maximum haben.
- AP3.3: Es wurden Test- und Vergleichsrechnungen mit dem Programmpaket RepoTREND zu den mit TOUGH2 durchgeführten Rechnungen durchgeführt. Der Unterschied zwischen der Rechnung mit dem langzeitsicherheitsanalytischen Programm RepoTREND und mit TOUGH2 beträgt einen Faktor 5,5, was auf eine Überschätzung des Tracerstroms durch die eindimensionale Betrachtung im Modell mit RepoTREND zurückzuführen ist. Dieser Unterschied wird als akzeptabel für die starke Vereinfachung der Modellgeometrie angesehen.
- AP3.4: Mit einem Modell für einen repräsentativen Ausschnitt aus der vollständigen Endlagergeometrie (Elementarzelle) wurden Vergleichsrechnungen zum vollständigen Modell durchgeführt. Sowohl der Gasdruck als auch die Lösungssättigung in der Strecke unterscheiden sich nur geringfügig zwischen dem Gesamtmodell und der Elementarzelle.
- AP3.5: Die durchgeführten Arbeiten wurden für den Abschlussbericht dokumentiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3.1: Testen der vom Unterauftragnehmer durchgeführten Entwicklungen am Code  $d^3f++$ . Übernahme der Parameter und Prozesse in das  $d^3f++$ -Modell. Durchführung von Modellrechnungen zum Radionuklidtransport
- AP3.2: Es sind keine weiteren Arbeiten in diesem Arbeitspaket geplant.
- AP3.3: Es sind keine weiteren Arbeiten in diesem Arbeitspaket geplant.
- AP3.5: Der Abschlussbericht wird zum Projektende erstellt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11658B</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt B			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2018 bis 30.04.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 479.565,24 EUR		<b>Projektleiter:</b> Jobmann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Um die im Rahmen des Vorhabens ANSICHT entwickelte Nachweismethodik zu prüfen, sollen im Rahmen dieses Vorhabens noch ausstehende Einzelnachweise demonstrativ dargestellt und damit die Nachweisführung illustriert werden. Offene Fragen im Nachweissystem, die zur einwandfreien Nachweisführung geklärt werden müssen, sollen identifiziert und klar dargestellt werden. Ziel ist es, durch die Gesamtschau der Einzelnachweise die in ANSICHT entwickelte Nachweismethodik zu evaluieren, ggf. Schwachstellen aufzuzeigen und Verbesserungsansätze zu liefern. Darüber hinaus soll diese Betrachtung aufzeigen, welche Daten, im Rahmen einer Standorterkundung, zielgerichtet erhoben werden müssen, damit ein Nachweis in geeigneter Weise geführt werden kann.

Um diese Ziele zu erreichen, werden sämtlicher Einzelnachweise, die für ein komplettes geotechnisches Barrierensystem im Tonstein durchgeführt werden müssten, illustrativ ausgeführt. Gegebenenfalls werden Anpassungen an den Konzepten vorgenommen, die eine verbesserte Nachweisführung erlauben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Darstellung und Evaluierung des Integritätsnachweises für die geologische Barriere (Federführung BGR)
- AP2: Darstellung und Evaluierung der Integritätsnachweise für das (geo)technische Barrierensystem (Federführung BGETEC)
- AP3: Darstellung des radiologischen Nachweises am Rand des ewG (Federführung GRS)
- AP4: Berichtswesen (Federführung (BGETEC)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das geotechnische Barrierensystem für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle in einer Tongesteinsformation besteht nach aktueller Planung aus den vier folgenden wesentlichen Barrieren:

- Bohrlochverschluss (Zum Verschluss jedes Einlagerungsbohrloches, nur bei vertikaler Bohrlochlagerung)
- Migrationssperre (Zum Verschluss einzelner Einlagerungsfelder)
- Streckenverschluss (Zum Verschluss der Einlagerungsbereiche)
- Schachtverschluss (Zum Verschluss des Bergwerkes; unterer Teil innerhalb des ewG).

Im Berichtszeitraum wurde ermittelt, welche hydraulischen Widerstände die einzelnen Barrieren haben müssen, damit eine Migration von Radionukliden allein durch die untertägigen Grubenräume aus dem ewG heraus nicht in einer unzulässigen Größenordnung auftreten kann. Diese Forderung ist in jedem Fall dann erfüllt, wenn das geotechnische Barrierensystem so dicht ist, dass über den Nachweiszeitraum die Radionuklide den Rand des ewG auf dem kürzesten Wege nicht erreichen. In Analogie zur Berechnung elektrischer Widerstände kann der hydraulische Widerstand des kompletten geotechnischen Barrierensystems in Form einer Reihenschaltung ermittelt werden. Jedes einzelne Dichtelement hat einen Strömungswiderstand, der die Migration von Lösungen innerhalb des Streckensystems behindert. Sämtliche hydraulischen Widerstände der Bauwerke addieren sich längs des Weges, den die Radionuklide, getragen von der Migration der Lösung, bis zum Rand des ewG zurücklegen müssen. Der Gesamtwiderstand entspricht also der Summe der Einzelwiderstände. Jeder dieser Widerstände setzt sich aus drei Teilwiderständen zusammen, dem Widerstand des Dichtmaterials selbst, dem Widerstand der Kontaktzone zwischen Dichtmaterial und Gebirge und dem Widerstand der Auflockerungszone. Der Gesamtwiderstand aus diesen drei Teilwiderständen lässt sich anhand einer Parallelschaltung bestimmen.

Im Rahmen des Verschlusskonzeptes wurden den wesentlichen Barrieren „Sicherheitsfunktionen“ und den weiteren Barrieren „Schutzfunktionen“ zugeordnet. Damit diese Sicherheits- oder Schutzfunktionen von den einzelnen Komponenten auch übernommen werden können, müssen jeder Komponente bestimmte Leistungsziele zugeordnet werden. Diese Leistungsziele orientieren sich an der oben beschriebenen Analyse der notwendigen hydraulischen Widerstände. Anhand der bereits aufgestellten Kriterien wurden beispielhaft Nachweise zur Bauwerksintegrität geführt. Dabei wurden Bohrlochverschluss, Migrationssperre und Schachtverschluss betrachtet. Hierfür wurden die Nachweise zur Filterstabilität geführt. Diese sind für Bentonitdichtelemente auf Basis der Kontakt- und Fugenerosionskriterien zu führen. Für die Filterschichten ist zunächst eine Korngrößenverteilung zu ermitteln, anschließend ist zusammen mit der Korngrößenverteilung des vor Erosion zu schützenden Materials die mechanische und hydraulische Filterwirksamkeit nachzuweisen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Durchführung von Einzelnachweise zur strukturellen Integrität einzelner Barrieren.
- Dokumentation der Ergebnisse in Berichtsform.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11668A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 986.599,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Noseck	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt SMILE (Partner: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR) und Institut für Nukleare Entsorgung des KIT (KIT-INE)) basiert auf den Erkenntnissen der Vorhaben ESTRAL und WEIMAR, in denen das Smart-K<sub>d</sub> Konzept für Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt, optimiert und in das Rechenprogramm r<sup>3</sup>t implementiert wurde. In SMILE sollen (i) das bisher entwickelte Konzept um den Einfluss von Redoxreaktionen erweitert, (ii) die chemische Beschreibung durch die Ermittlung der Stöchiometrie, Struktur und thermodynamischer Parameter wichtiger Oberflächenkomplexe weiter untermauert, (iii) unterschiedliche State-of-the-art Oberflächenkomplexmodelle zur Auswertung von vorhandenen experimentellen Daten angewandt, (iv) die Sorptions-Datenbasis durch geeignete Batch- und Säulenexperimente weiter ergänzt und (v) das Konzept durch gezielte Experimente und Modellierung von naturnahen Systemen kritisch überprüft werden. Das hier zu entwickelnde Konzept wird sowohl auf andere Formationen als auch auf andere Codes übertragbar sein und somit auch einen Wissenstransfer zu anderen Forschungsfeldern gestatten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konzepterweiterung  
(Weiterentwicklung des konzeptuellen Modells: Implementierung von Redox-Prozessen, Erarbeitung eines Konzepts zur Berücksichtigung organischer Liganden)
- AP2: Verifizierung des erweiterten WEIMAR-Konzepts  
(Vergleichsrechnungen für einfache Testfälle mit PHREEQC bzw. PHAST)
- AP3: Titrations-, Sorptions- und Transportexperimente  
(Durchführung von Laborexperimente u. a. im Rahmen von Bachelor-/Masterarbeiten)
- AP4: Parametrisierung und Berechnung von Smart-K<sub>d</sub>-Matrizen  
(Ableitung thermodynamischer Sorptionsdaten und K<sub>d</sub>-Berechnung für das erweiterte Konzept)
- AP5: Großräumige Anwendungsrechnungen  
(Strömungs- und Transportrechnungen für ausgewählte Modellgebiete)
- AP6: Qualitätsmanagement/Dokumentation/Internetseite

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Durchführung weiterer realer und virtueller Arbeitstreffen zur Implementierung der Redoxprozesse in das Transportprogramm  $d^3f++$ . Update zur Strategie für die Implementierung der Redoxprozesse mit Schwerpunkt auf Konvergenzverbesserung (Geschwindigkeit & Stabilität).
- AP2: Abschluss der Verifikationsrechnungen mit  $d^3f++$  und PHAST bezüglich der Equilibrierung mit Calcit. Dokumentation der Ergebnisse für eine Veröffentlichung. Aufsetzen eines Testfalls zur Equilibrierung mit Gibbsite und Durchführung von Vergleichsrechnungen. Debugging und Prüfung des Konzeptes anhand von Simulationsergebnissen.
- AP3: Veröffentlichung der Publikation zur Sorption von Ac(III), Ln(III) an Feldspäten. Probenpräparation zur Durchführung von EXAFS Analysen zur Sorption von Eu und Ni an Quarz in enger Zusammenarbeit mit KIT INE. Auswertung von Titrationsexperimenten mittels thermodynamischer Sorptionsmodelle (diffuse double layer model) zur Beschreibung der Oberflächenladungsdichte von Orthoklas. Planung und Betreuung von Säulenversuchen in Systemen mit Ni u. a. bei erhöhter Ionenstärke und in Konkurrenz mit Eu.
- AP6: Durchführung eines weiteren virtuellen Arbeitstreffens mit allen Verbundpartnern zur Diskussion der Ergebnisse und Koordinierung der weiteren Arbeiten. Update der Smart-K<sub>d</sub> Internetseite.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Weiterentwicklung des Konzeptes zur Implementierung von Redoxprozessen.
- AP2: Fortführung der Verifikationsrechnungen zum Gibbsite-Testfall. Weiterentwicklung der Veröffentlichung.
- AP3: Auswertung von Titrationsexperimenten zu verschiedenen Quarzsanden und Vorbereitung einer Publikation zur Sorption von Eu an Quarz unter Einbeziehung von EXAFS Analysen. Durchführung und Auswertung von Säulenversuchen in Systemen mit Ni u. a. bei erhöhter Ionenstärke und in Konkurrenz mit Eu. Versuchsplanung zu Sorptionsisothermen zum Kationenaustausch von Muskovit. Planung und Durchführung von Batchversuchen zum Sorptionsverhalten von Ni an Orthoklas in Konkurrenz mit Ca und Quarz mit Eu.
- AP5: Durchführung großräumiger Strömungs- und Transportrechnungen zur Anwendung des neuen Konzeptes.
- AP6: Durchführung eines weiteren Projekttreffens mit den Verbundpartnern HZDR und KIT-INE in Karlsruhe und kontinuierliche Pflege der Internet-Präsenz.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Neumann, J., Brinkmann, H., Britz, S., Lützenkirchen, J., Bok, F., Stockmann, M., Brendler, V., Stumpf, T., Schmidt, M., (2020): A comprehensive study of the sorption mechanism and thermodynamics of f-element sorption onto K-feldspar. *J. Colloid Interface Sci.*, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.11.041>

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11668B</b>
Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 580.851,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Brendler	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt SMILE (Partner: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, und Institut für Nukleare Entsorgung des KIT (KIT-INE)) basiert auf den Erkenntnissen der Vorhaben ESTRAL und WEIMAR, in denen das Smart-K<sub>d</sub> Konzept für Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt, optimiert und in das Rechenprogramm r<sup>3</sup>t implementiert wurde. In SMILE sollen (i) das bisher entwickelte Konzept um den Einfluss von Redoxreaktionen erweitert, (ii) die chemische Beschreibung durch die Ermittlung der Stöchiometrie, Struktur und thermodynamischer Parameter wichtiger Oberflächenkomplexe weiter untermauert, (iii) unterschiedliche State-of-the-art Oberflächenkomplexmodelle zur Auswertung von vorhandenen experimentellen Daten angewandt, (iv) die Sorptions-Datenbasis durch geeignete Batch- und Säulenexperimente weiter ergänzt und (v) das Konzept durch gezielte Experimente und Modellierung von naturnahen Systemen kritisch überprüft werden. Das hier zu entwickelnde Konzept ist sowohl auf andere Formationen als auch auf andere Codes übertragbar und gestattet somit auch einen Wissenstransfer zu anderen Forschungsfeldern.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konzepterweiterung  
(Weiterentwicklung des konzeptuellen Modells: Implementierung von Redox-Prozessen, Erarbeitung eines Konzepts zur Berücksichtigung organischer Liganden)
- AP2: Verifizierung des erweiterten WEIMAR-Konzepts  
(Vergleichsrechnungen für einfache Testfälle mit PHREEQC bzw. PHAST)
- AP3: Titrations-, Sorptions- und Transportexperimente  
(Durchführung von Laborexperimente u. a. im Rahmen von Bachelor-/Masterarbeiten)
- AP4: Parametrisierung und Berechnung von Smart-K<sub>d</sub>-Matrizen  
(Ableitung thermodynamischer Sorptionsdaten und K<sub>d</sub>-Berechnung für das erweiterte Konzept)
- AP5: Großräumige Anwendungsrechnungen  
(Strömungs- und Transportrechnungen für ausgewählte Modellgebiete)
- AP6: Qualitätsmanagement/Dokumentation/Internetseite

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Update zur Strategie für die Implementierung der Redoxprozesse mit Schwerpunkt auf Konvergenz-verbesserung (Geschwindigkeit & Stabilität)
- AP2: Bereitstellung weiterer Testfälle zur Verifizierung des WEIMAR-Konzepts.
- AP3:  $M^{3+}$ -Sorption an K-Feldspat, zugehörige Publikation ist im Druck  
 Synthese von Ca-Feldspat, Batch-Sorptionsexperimente sowie Eu- und Cm-TRLFS der  $M^{3+}$ -Sorption an synthetischen Ca-Feldspat, derzeit Vervollständigung der Datensätze und Datenanalyse  
 Aufklärung des Sorptionsmechanismus für Th auf Muskovit: Manuskript zum Th-Sorptionsmechanismus derzeit im internen Review-Prozess  
 Batch-Sorptionsexperimente und Eu-TRLFS zur Sorption von  $M^{3+}$  auf Muskovit und anderen minoren Bestandteilen von Granit (Apatit, Biotit, Chlorit, Hornblende). Datenanalyse der Sorption von  $M^{3+}$ -Sulfat-Spezies auf der Muskovit(001)-Basalfläche  
 Vorversuche zur Sorption von U(IV) an Mineralphasen
- AP6: Virtuelle Projekttreffen mit den Verbundpartnern GRS und KIT-INE, Update der Internet-Präsenz unter „www.smartkd-concept.de“

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Implementierung von Redoxprozessen in  $d^{3f++}$ , Arbeitstreffen mit dem G-CSC Frankfurt zur entsprechenden Codierung (wegen COVID-19 ausgefallen)
- AP3: Durchführung von Batch-Sorptionsexperimenten weiterer natürlicher Ca-Feldspäte und Isothermen-Sorptionsexperimenten von  $M^{3+}$  an Feldspat und Muskovit, Modellierung der Daten zur Erhebung thermodynamischer Parameter  
 Wiederholung der Einzelkristall-Diffraktometrie (SXD) zur Sorptionsstruktur von  $M^{3+}$  auf K-Feldspat mit neuen Mineralproben (Ausfall durch COVID-19, nun: 04/2021)  
 Entwicklung eines Oberflächenkomplexierungsmodells zur  $M^{3+}$ -Sorption an Muskovit und minoren Bestandteilen von Granit  
 Modellierung und Ermittlung des log K für die Sorption von  $M^{3+}$ -Sulfat-Spezies auf die Muskovit(001)-Basalfläche, Vorbereitung einer Publikation  
 Auswertung der SXD Daten zur Sorption von Zn an Hämatit, Vorbereitung einer Publikation  
 Durchführung von Batch-Sorptionsexperimenten mit U(IV) an Mineralphasen
- AP6: Verbund-Projekttreffen in Karlsruhe, kontinuierliche Pflege der Internet-Präsenz

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Neumann, J., Brinkmann, H., Britz, S., Lützenkirchen, J., Bok, F., Stockmann, M., Brendler, V., Stumpf, T., Schmidt, M., 2020: A comprehensive study of the sorption mechanism and thermodynamics of f-element sorption onto K-feldspar. *J. Colloid Interface Sci.*, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.11.041>

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie(KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11668C</b>
Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 117.142,34 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Lützenkirchen	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt SMILE (Partner: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR) und Institut für Nukleare Entsorgung des KIT (KIT-INE)) basiert auf den Erkenntnissen der Vorhaben ESTRAL und WEIMAR, in denen das Smart-K<sub>d</sub> Konzept für Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt, optimiert und in das Rechenprogramm r<sup>3</sup>t implementiert wurde. In SMILE sollen (i) das bisher entwickelte Konzept um den Einfluss von Redoxreaktionen erweitert, (ii) die chemische Beschreibung durch die Ermittlung der Stöchiometrie, Struktur und thermodynamischer Parameter wichtiger Oberflächenkomplexe weiter untermauert, (iii) unterschiedliche State-of-the-art Oberflächenkomplexmodelle zur Auswertung von vorhandenen experimentellen Daten angewandt, (iv) die Sorptions-Datenbasis durch geeignete Batch- und Säulenexperimente weiter ergänzt und (v) das Konzept durch gezielte Experimente und Modellierung von naturnahen Systemen kritisch überprüft werden. Das hier zu entwickelnde Konzept wird sowohl auf andere Formationen als auch auf andere Codes übertragbar sein und somit auch einen Wissenstransfer zu anderen Forschungsfeldern gestatten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konzepterweiterung  
(Weiterentwicklung des konzeptuellen Modells: Implementierung von Redox-Prozessen, Erarbeitung eines Konzepts zur Berücksichtigung organischer Liganden)
- AP2: Verifizierung des erweiterten WEIMAR-Konzepts  
(Vergleichsrechnungen für einfache Testfälle mit PHREEQC bzw. PHAST)
- AP3: Titrations-, Sorptions- und Transportexperimente  
(Durchführung von Laborexperimente u. a. im Rahmen von Bachelor-/Masterarbeiten)
- AP4: Parametrisierung und Berechnung von Smart-K<sub>d</sub>-Matrizen  
(Ableitung thermodynamischer Sorptionsdaten und K<sub>d</sub>-Berechnung für das erweiterte Konzept)
- AP5: Großräumige Anwendungsrechnungen  
(Strömungs- und Transportrechnungen für ausgewählte Modellgebiete)
- AP6: Qualitätsmanagement/Dokumentation/Internetseite

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP3: Geplante Besuche konnten wegen CORONA nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurden Proben in den jeweiligen Instituten präpariert und dann ggfs. verschickt. Die EXAFS Messungen wurden Anfang Dezember bei KARA durchgeführt. Es wurden neben Eu auch Ni Sorptionsproben an SiO<sub>2</sub> Proben untersucht. Weitere Strömungspotential-Messungen wurden mit Kombinationen aus pre-equilibrierten Orthoklas, den zugehörigen Gleichgewichtslösungen und den jeweiligen nicht-pre-equilibrierten Systemen durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Pre-Equilibrierung wohl der einzige Weg ist, um aussagekräftige Ladungsdaten zu erhalten.

Es wurden an Proben aus den Säulenversuchen (Glimmer, Orthoklas, Quarz) laser-spektroskopische Untersuchungen durchgeführt. Die Messungen sind noch nicht abgeschlossen und wurden zuletzt wieder wegen des Lockdowns verschoben.

Eine gemeinsame Veröffentlichung zur Adsorption von Eu an Orthoklas wurde akzeptiert. Dort enthalten sind u. a. auch die Titrationsergebnisse, die mit der ÄKTA-Anlage erhalten wurden. Übergreifend auf andere Arbeitspakete: Beiträge zum Adsorptionsmodell für Eu an Orthoklas, das im Rahmen der Veröffentlichung erstellt wurde (AP4).

AP6: Virtuelles (jährliches) Projekt Meeting zu allen Arbeitspaketen.  
Beiträge zur Internetseite, die auf einen neuen Stand gebracht wurde.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Weiterführung der experimentellen Arbeiten (Laser-Spektroskopie an Proben aus Säulenversuchen und Strömungspotential-Messungen mit Gleichgewichts- und Nichtgleichgewichtslösungen).

Verwendung des Adsorptionsmodells für Eu an Orthoklas zur Simulation der vorhandenen Säulendaten.

Auswertung der EXAFS-Daten.

Design von Eu- und Ni- Adsorptionsmodellen für Quarz/Sand und anschließende Simulation der Säulendaten.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Neumann, J; Brinkmann, H; Britz, S; Lützenkirchen, J; Bok, F; Stockmann, M; Brendler, V; Stumpf, T; Schmidt, M: A comprehensive study of the sorption mechanism and thermodynamics of f-element sorption onto K-feldspar. Journal of colloid and interface science, DOI:10.1016/j.jcis.2020.11.04, veröffentlicht: 2020-Nov-13 (Epub 2020 Nov 13)

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11678</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Untersuchungen zur Vervollständigung von Stoffmodellen für Salz- oder Sorelbeton sowie spezieller low-ph und hochdichter bzw. hochfester Betone zum rechnerischen Nachweis der Rissbeschränkung für Bauwerke (UVERSTOFF)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 30.04.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 304.370,76 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Müller-Hoeppe	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Bei allen Endlagerkonzepten in den unterschiedlichen Wirtsgesteinen Salz, Tongestein und Kristallin werden im Zusammenhang mit dem jeweiligen Verschlussystem Funktionselemente aus Beton verschiedener Rezepturen eingesetzt. Wird dem Funktionselement aus Beton eine Barrierefunktion zugeordnet, ist der Integritätsnachweis, d. h. der Nachweis der Rissbeschränkung, zu führen, da andernfalls die hydraulische Durchlässigkeit des Gesamtsystems durch die Risse bestimmt wird. In einem HAW-Endlager ist dabei zu berücksichtigen, dass Betonbarrieren, die in der Nähe von Einlagerungsfeldern angeordnet sind, nach ihrer Erhärtung zu einem späteren Zeitpunkt erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind. Daraus resultiert die spezifische Anforderung, den Integritätsnachweis für eine thermische Einwirkung nach Erhärtung zu führen. Dabei sind die viskosen Materialeigenschaften des Betons im Hinblick auf den Abbau von potenziell rissinduzierenden Zwangs- und Eigenspannungen von hoher Bedeutung. Eine thermische Aktivierung des viskosen Verhaltens wird in den Stoffmodellen für den Integritätsnachweis bisher nicht erfasst, obwohl Indexversuche einen solchen Einfluss aufzeigen. Ein geeignetes, verfügbares Stoffmodell für Beton soll so erweitert werden, dass der Einfluss der thermischen Aktivierung bei der rechnerischen Simulation erfasst wird.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Zusammenstellung vorhandener und Auswahl geeigneter Teilstoffmodelle zur Modellierung des Betonverhaltens (Salz- und Sorelbeton sowie low-ph-Beton)
- AP2: Ermittlung und Zusammenstellung versuchstechnischer Grundlagen
- AP3: Qualifizierung der Teilstoffmodelle
- AP3.1: Überprüfung/Validierung der Teilstoffmodelle
- AP3.2: Übertragung der Ergebnisse für das Betonverhalten, ggf. von Teilstoffmodellen, auf low-ph-Beton
- AP3.3: Weitergehende Qualifizierung des Stoffmodells
- AP4: Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Der bisher implementierte Ansatz, der die erwarteten Mechanismen synthetisch wiedergibt, wird weiterhin verwendet und dient somit als Grundlage für AP2 und AP3.
- AP2: Die Zusammenstellung versuchstechnischer Grundlagen für den Sorelbeton wurde um die zusätzlich von der GRS bereitgestellten Versuchsergebnisse erweitert und damit die Entscheidungsgrundlage für den zu behandelnden Trend bereitgestellt. Eine Neuidentifikation der Parameter wurde allerdings vorläufig zurückgestellt, da die Betrachtung der Versuchsergebnisse zeigte, dass die bisher identifizierten Parameter den Trend wiedergeben und damit die Frage des generell zu steifen Verhaltens bei der Nachrechnung des Versuches nicht gelöst wird. Deshalb wurden vorzugsweise die in AP3 bereits begonnenen Parametervariationen zur Bestimmung der maßgeblichen Parameter für das zu steife Verhalten auf vergleichbarer Parametergrundlage weitergeführt.
- AP3: Um die maßgeblichen Parameter für das zu steife Verhalten zu ermitteln, wurden die Parametervariationen weitergeführt. Bisher vorliegende Ergebnisse zu Variationen zeigen, dass die meisten Parameter das Ergebnis nicht maßgeblich beeinflussen. Bisher zeigten nur wenige einen starken Einfluss, die allerdings als gesichert bekannt gelten. Da noch nicht zu allen Variationen Ergebnisse vorliegen, werden diese Arbeiten derzeit mit Priorität weitergeführt, um bis zum Projektabschluss für den gewählten Ansatz eine umfassende Darstellung geben zu können.  
Begleitend wird untersucht, wie sich die bisher vorliegenden Ergebnisse einordnen lassen.
- AP4: Mit der Erstellung des Abschlussberichtes wurde begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Beschreibung und Begründung für den implementierten Ansatz erfolgt nunmehr in AP4. Deshalb werden AP1 keine weiteren Arbeiten zugeordnet.
- AP2: Der zur Verbreiterung der Datenbasis zusätzlich durchgeführte Versuch wurde soweit aufbereitet, dass der Trend bestimmt werden konnte. Nach Durchführung der Parametervariationen in AP3 wird er in die Parameteridentifikation für die Materialkennwerte einbezogen.
- AP3: Es werden weitere Parametervariationen durchgeführt, um die Erkenntnisse zu ergänzen und abzusichern, welche Parameter wesentlich für das zu steife Verhalten sind. Die begleitende Recherche zu möglichen Ursachen wird fortgesetzt.
- AP4: Die Berichtserstellung wird weitergeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolf-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11688</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 506.541,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Düsterloh	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Durchführung, Auswertung und numerisch-rechnerische Reanalyse von Technikumsversuchen an Großprüfkörpern aus Salzschnittblöcken mit und ohne Fugenfüllung zur Untersuchung der Dicht- und Tragwirkung des Systems unter in situ relevanten THM-Belastungen. Bezug zu anderen Vorhaben: Für die Reanalyse von Abdichtungssystemen aus Salzschnittblöcken mit Fugenfüllung aus Salzgrus werden die im Rahmen des Forschungsvorhabens KOMPASS (02E11708D) erarbeiteten Ergebnisse zur stoffmodelltheoretischen Charakterisierung von Salzgrus integriert.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Beschaffung von gewachsenem Steinsalz
- AP2: Herstellung von Salzschnittblöcken
- AP3: Durchführung und Auswertung von Technikumsversuchen unter variierten THM-Beanspruchungen
- AP4: Rechnerische Reanalyse der Technikumsversuche mit Verifikation, Validation und Ertüchtigung/Erweiterung der Berechnungssoftware
- AP5: Erstellung Schlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: abgeschlossen.
- AP2: Weiterführung der Herstellung von Salzschnittblöcken für einen zweiten Prüfkörper mit gleicher Konfiguration der Salzschnittblock-Konstruktion ohne Fugenfüllung (340/395). Weiterführung der Herstellung von Salzschnittblöcken für einen weiteren Prüfkörper mit Fugenfüllung (250/395).
- AP3: Weiterführung des mechanischen Kompaktionsversuchs unter eingeschränkter Axialdehnung mit einer Axialdeformationstoleranz von 0,2 mm und einer konstanten Mantelspannung von 12,5 MPa mit Durchführung von Gas-Permeabilitätsversuchen mit variierten Gasgradienten.  
Konstruktion und Bau einer dreigliedrigen Schalung zum zerstörungsfreien Ausbau des Salzschnittprüfkörpers.  
Schädigungsfreier Ausbau der SSB-Probe und Durchführung von Dummy-Versuchen mit Gas-Permeabilitätsmessungen bei variierten Gasgradienten.  
Ultraschallreinigung der Sinterplatten und Anfertigung von konstruktiv modifizierten Sinterplatten.

AP4: Rechnerische Reanalysen des Technikumsversuchs:

- (1) Vorgehensweise mit Interface-Flächen für Fugensimulation:
  - (a) Konvertierung der FISH-Funktion von FLAC5.0 auf FLAC3D7.0 für ein viskoses (zeitabhängiges) Verhalten der Interface-Elemente entsprechend Kompaktionsmodell C-WIPP;
  - (b) Testvariationen für unterschiedliche Modellgrößen: Gesamtmodell 15 Schichten – 360 °, Sektor-Modell 15 Schichten – 30 °, Sektor-Abschnittsmodell 3 Schichten – 15 °;
  - (c) Testvariationen für unterschiedliche Fugenbreiten: 5 mm (Fugenfüllung Salzgrus) und 0,1 mm (ohne Fugenfüllung);
  - (d) Vergleich der Ergebnisse mit Referenz-Vorgehensweise zur Beurteilung der Anwendbarkeit und Praktikabilität der Interface-Flächen für Fugensimulation.
- (2) Vorgehensweise mit Salzgrus-Elementen für Fugensimulation (= Referenz-Vorgehensweise aus letzter Projekthase):
  - (a) Anwendung einer modifizierten Variante des C-WIPP-Modells C-WIPP-TUC-2020 (Entwicklung von TUC im Rahmen von Projekt KOMPASS) für eine plausiblere, stabilere und realitätsnähere Beschreibung der Salzgruskompaktion in den Fugen;
  - (b) Testvariationen für unterschiedliche Modellgrößen: Gesamtmodell 15 Schichten – 360 °, Sektor-Modell 15 Schichten – 30 °, Sektor-Abschnittsmodell 3 Schichten – 15 °;
  - (c) Testvariationen für unterschiedliche Fugenbreiten: 5 mm (Fugenfüllung Salzgrus) und 0,1 mm (ohne Fugenfüllung);
  - (d) Testvariationen für unterschiedliche Materialparameter und unterschiedliche Anfangsporositäten für Salzgrus in der Fugenfüllung.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Weiterführung der Herstellung von Salzschnittblöcken für einen Prüfkörper ohne Fugenfüllung.  
Weiterführung der Herstellung von Salzschnittblöcken für einen weiteren Prüfkörper mit Fugenfüllung.
- AP3: Fortführung der Dummy-Versuche mit Gas-Permeabilitätsmessung bei verschiedenen Gasgradienten;  
Wiedereinbau und Durchführung der Gas-Permeabilitätsversuche mit dem ersten SSB-Prüfkörper mit neuen Sinterplatten;  
Durchführung eines weiteren Versuchs mit zunächst mechanischer und nachfolgend mechanisch-hydraulischer Belastung mit einem zweiten Prüfkörper mit gleicher Konfiguration der Salzschnittblock-Konstruktion (ohne Fugenfüllung).  
Durchführung eines Versuchs mit zunächst mechanischer und nachfolgend mechanisch-hydraulischer Belastung mit einem Prüfkörper mit Fugenfüllung.
- AP4: Weiterführung der rechnerischen Reanalysen des Technikumsversuchs mit beiden aktuell verwendeten Vorgehensweisen – mit Interface-Flächen für Fugensimulation und mit Salzgrus-Elementen für Fugensimulation (Referenz-Vorgehensweise).  
Durchführung prognostischer hydromechanisch gekoppelter HM-Simulationsreihen mit Referenzvorgehensweise anhand des 3 Schichten – 15 ° Sektor-Modells.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11698</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwirkungen auf zementbasierte Dichtelemente (THYMECZ)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2022		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.903.917,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Meyer	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist die systematische Untersuchung der thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozesse (THMC-Prozesse), die sich auf die Integrität eines Abdichtungselements bzw. des gesamten Abdichtsystems in einem Endlager auswirken können. Aufbauend auf den Erkenntnissen zahlreicher Pilotversuche an kombinierten Prüfkörpern aus Salzbeton und Steinsalz, die im Rahmen von LAVA-2 und LASA-EDZ gewonnen wurden, sollen, anhand systematisch aufgebauter Versuchsreihen, einzelne/gekoppelte THMC-Prozesse untersucht und die daraus resultierende Wirkung auf die Integrität der geotechnischen Barriere herausgearbeitet werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Bereitstellung von Material und Methoden
- AP2: HC-Untersuchungen
- AP3: HMC-Untersuchungen
- AP4: THC-Versuche
- AP5: TM-Versuche
- AP6: THMC-Versuche
- AP7: Modelltheoretische Untersuchungen
- AP8: Dokumentation
- AP9: Analyse von Salzprüfkörper aus der WIPP

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: In diesem Arbeitspaket erfolgt die Zusammenstellung bzw. Entwicklung geeigneter Untersuchungsmethoden basierend auf vorlaufenden FuE-Vorhaben. Die Treffen des Arbeitskreises Betonkorrosion (AKB) im Jahr 2020 wurden aufgrund von Corona ausgesetzt.
- AP2: An dem HC-Messstand werden seit fast zwei Jahr kombinierte Probekörper (Abdichtmaterial/Salz) für die Materialien A1 und M2 sowie monolithische Probekörper (MP) für die Materialien M2, M2-ERAM, M4 und A1 untersucht. Der Probekörper der Assekontaktzone im Kontakt zu IP21-Lösung zeigte eine Permeabilität von  $k \sim 10^{-19} \text{ m}^2$  im

Kontakt zu NaCl-Lösung konnte kein Fluss beobachtet werden. Zwei nur in Araldit eingegossene Salzzylinder zeigten keine oder nur geringe Permeabilität von  $k \sim 10^{-19} \text{ m}^2$ , die im Verlauf der Durchströmung weiter auf  $k < 10^{-20} \text{ m}^2$  abnahm.

- AP3: Zurzeit werden in den Autoklaven kombinierten Probekörper des Sorelbeton A1 nochmals untersucht. Aufgrund der hohen Anfangspermeabilität wurden diese Proben zunächst bei anliegendem Manteldruck von 50/100 bar vorkompaktiert, um bei den anschließenden Messungen bei 10 bar eine Ausgangspermeabilität von ca.  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  zu erreichen. Im Kontakt zu IP21-Lösung zeigte sich eine Erhöhung um ca. eine halbe Größenordnung, während im Kontakt zu NaCl-Lösung eine Abnahme der Permeabilität von mehr als eine Größenordnung zu beobachten war.
- AP4: Für die THC-Versuche wurde entsprechend den HC-Versuchen ein Messstand aufgebaut, wobei der Aufbau in 2 Klimaschränken realisiert worden ist. Es sind jeweils 8 Probekörper für eine Lösung eingebaut. Die „kritischen Proben“, bei denen die ersten Versuche bereits gezeigt haben, dass es zum schnellen Versagen des Dichtkörpers kommt, wurden an separate Lösungsreservoirs angeschlossen. Die Ergebnisse der ersten Untersuchungen an den monolithischen Probekörpern des A1 konnten bestätigt werden, jedoch kam es zum Lösungsdurchbruch über die Weihnachtsfeiertage. Aufgrund der getroffenen Vorkehrungen, blieben die übrigen Proben unbeeinflusst.
- AP5: Die im AP5 vorgesehenen Versuche wurden erfolgreich abgeschlossen.
- AP6: Der Aufbau des THMC-Messstandes wurde konzipiert und ein Angebot seitens eines Herstellers liegt vor.
- AP7: Das derzeitige Modell, das die Korrosion von Abdichtelementen numerisch abbildet, könnte weniger konservativ sein als bisher angenommen und soll daher überarbeitet werden. Das Modellverständnis der Korrosionsprozesse soll dabei mit Hilfe der durchgeführten Experimente vertieft werden.
- AP8: Erstellung der Dokumente zur Qualitätssicherung der Arbeiten im Projekt sowie die Erstellung des Halbjahres- und Jahresberichtes.
- AP9: Die Prüfkörper konnten noch nicht zur Verfügung gestellt werden, da die Kernbohrungen in der WIPP Corona-bedingt nicht wie geplant durchgeführt werden konnten. Zu welchem Zeitpunkt die Kerne gebohrt und an die GRS gesandt werden können, ist derzeit nicht absehbar.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Alle Versuche werden entsprechend des aufgestellten Versuchsplans fortgeführt. Es werden noch einmal Probekörper des Sorelbetons A1 unter im Vorfeld definierten und abgestimmten Randbedingungen hergestellt.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11708A</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt A			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2020		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.08.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 206.313,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Czaikowski	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Vorhabens ist die Methoden- und Strategieentwicklung, um die Defizite bei der Prognose der Kompaktion von Salzgrusversatz zu verringern und damit die Voraussetzungen für die Stärkung des Sicherheitsnachweises für ein Endlager im Steinsalz zu schaffen. Dies beinhaltet die Schaffung experimenteller Grundlagen für die Bestimmung von Salzgruseigenschaften im Bereich kleiner Porositäten, die Entwicklung des Prozessverständnisses und die Entwicklung modelltechnischer Strategien zur Ermöglichung einer belastbaren Prognose der Salzgruskompaktion im Hinblick auf den sicheren Einschluss.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

### AP1: Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen zu (AP1.1) ist beabsichtigt, eine Salzgruskompaktion zu realisieren, wie sie der Beanspruchungssituation in situ entspricht, ohne hierfür allerdings die lange In-situ-Kompaktionsphase abbilden zu müssen (Herstellung vorkompakter Salzgrusprüfkörper im Zeitraffer). Im Ergebnis der Untersuchungen soll das in vergleichsweise kurzer Zeit generierte Prüfkörpermaterial die gleichen THM-Eigenschaften ausweisen, wie ein in situ durch den Konvergenzprozess kompakter Salzgrus. Der vorkompaktierte Salzgrus soll als Ausgangsmaterial für die Langzeitversuche zu (AP1.2) verwendet werden, so dass auf die sonst erforderliche und mehrere Monate bis Jahre andauernde Vorversuchsphase für Untersuchungen zum THM-Verhalten von Salzgrus für kleine Porositäten verzichtet werden kann. Als Referenzmaterial soll neben bekannten Materialvarietäten erstmals in (AP1.3) auch Salzgrus aus flacher Lagerung untersucht werden.

### AP2: Gefügeuntersuchungen zum Prozessverständnis

Die Identifikation der während der Salzkompaktion ablaufenden Verformungsmechanismen und deren Quantifizierung sind wesentlich für das Prozessverständnis. Ausgehend von der Zielstellung, dass mit der Vorkonsolidierung im „Zeitraffer“ schon eine Probenporosität in der Größenordnung von ca. 10 % erreicht wird, ist zu dokumentieren, dass sich während der Vorkonsolidierung bei Wiederholung ein reproduzierbares Korngefüge einstellt, und dass u. a. keine unnatürlichen Gefügeveränderungen, z. B. durch Spannungskonzentrationen an Kontaktstellen, auftreten. Hierfür werden in (AP2.1) die Deformations- bzw. Porenraumgefüge der experimentell vorkompaktierten Proben un-

tersucht und miteinander sowie mit technischen Analoga in (AP2.2) verglichen. Zur Beschreibung und für eine Quantifizierung des Einflusses von Feuchtigkeit auf das Kompaktionsverhalten sollen in (AP2.3) die oben genannten Untersuchungsverfahren getestet und bzgl. ihres Potentials bewertet werden.

**AP3: Modelltechnische Strategie**

Dieses Arbeitspaket beschäftigt sich mit der Entwicklung modelltechnischer Strategien für die Beschreibung des hydromechanischen Salzgrusverhaltens im Bereich kleiner Porosität im Hinblick auf die Nachweisführung für den sicheren Einschluss. In (AP3.1) sollen die Anforderungen an die Prozessmodelle untersucht werden, die sich aus den Bedürfnissen der Nachweisführung für die Langzeitsicherheit ergeben. In (AP3.2) sollen die bestehenden Modellansätze genauer untersucht werden. Wichtig in dem Zusammenhang ist beispielsweise, welche Prozesse nachgebildet werden (können), welchen Einfluss die verschiedenen Parameter haben und in welchen Grenzen die Anwendung überhaupt zulässig ist. Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden an Hand einfacher Simulationsbeispiele ermittelt und dokumentiert. Die Simulation der Salzgruskompaktion mit Prozessmodellen muss belastbare Ergebnisse liefern, aus denen in (AP3.3) die vereinfachten Beziehungen der Langzeitsicherheitsanalyse abgeleitet werden bzw. mit denen diese geprüft werden können.

**AP4: Dokumentation und Synthese**

In AP4 werden die Ergebnisse der übrigen Arbeitspakete dokumentiert und zusammengefasst sowie die Richtung für die systematische Lösung der verbleibenden Fragen festgelegt.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Im Berichtszeitraum hat aufgrund der Corona-Situation ein virtuelles Projekttreffen am 09.07.2020 als Videokonferenz stattgefunden. In diesem Gespräch wurden die Struktur des gemeinsamen Abschlussberichts sowie die bisher vorhandenen Beiträge des Abschlussberichts besprochen. Weitere Arbeit und Textbeiträge wurden diskutiert.

Die GRS koordinierte den Ablauf zur Erstellung des Abschlussberichtes. Hierzu gehörte die Aufteilung der Textbeiträge auf die Partner, das Sammeln und Zusammenführen der Passagen zu einem Dokument und Einfügen der Kommentare aus Review-Prozessen. Die GRS trug auch mit Textbeiträgen zu dem Abschlussbericht bei.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine. Vorhaben zum 31.08.2020 beendet.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11708B</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2020		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.08.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 198.873,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Müller-Hoeppe	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Vorhabens ist die Methoden- und Strategieentwicklung, um die Defizite bei der Prognose der Kompaktion von Salzgrusversatz zu verringern und damit die Voraussetzungen für die Stärkung des Sicherheitsnachweises für ein Endlager im Steinsalz zu schaffen. Dies beinhaltet die Schaffung experimenteller Grundlagen für die Bestimmung von Salzgruseigenschaften im Bereich kleiner Porositäten, die Entwicklung des Prozessverständnisses und die Entwicklung modelltechnischer Strategien zur Ermöglichung einer belastbaren Prognose der Salzgruskompaktion im Hinblick auf den sicheren Einschluss.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

### AP1: Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen zu (AP1.1) ist beabsichtigt, eine Salzgruskompaktion zu realisieren, wie sie der Beanspruchungssituation in situ entspricht, ohne hierfür allerdings die lange In-situ-Kompaktionsphase abbilden zu müssen (Herstellung vorkompakter Salzgrusprüfkörper im Zeitraffer). Im Ergebnis der Untersuchungen soll das in vergleichsweise kurzer Zeit generierte Prüfkörpermaterial die gleichen THM-Eigenschaften ausweisen, wie ein in situ durch den Konvergenzprozess kompakter Salzgrus. Der vorkompaktierte Salzgrus soll als Ausgangsmaterial für die Langzeitversuche zu (AP1.2) verwendet werden, so dass auf die sonst erforderliche und mehrere Monate bis Jahre andauernde Vorversuchsphase für Untersuchungen zum THM-Verhalten von Salzgrus für kleine Porositäten verzichtet werden kann. Als Referenzmaterial soll neben bekannten Materialvarietäten erstmals in (AP1.3) auch Salzgrus aus flacher Lagerung untersucht werden.

### AP2: Gefügeuntersuchungen zum Prozessverständnis

Die Identifikation der während der Salzkompaktion ablaufenden Verformungsmechanismen und deren Quantifizierung sind wesentlich für das Prozessverständnis. Ausgehend von der Zielstellung, dass mit der Vorkonsolidierung im „Zeitraffer“ schon eine Probenporosität in der Größenordnung von ca. 10 % erreicht wird, ist zu dokumentieren, dass sich während der Vorkonsolidierung bei Wiederholung ein reproduzierbares Korngefüge einstellt, und dass u. a. keine unnatürlichen Gefügeveränderungen, z. B. durch Spannungskonzentrationen an Kontaktstellen, auftreten. Hierfür werden in (AP2.1) die Deformations- bzw. Porenraumgefüge der experimentell vorkompaktierten Proben un-

tersucht und miteinander sowie mit technischen Analoga in (AP2.2) verglichen. Zur Beschreibung und für eine Quantifizierung des Einflusses von Feuchtigkeit auf das Kompaktionsverhalten sollen in (AP2.3) die oben genannten Untersuchungsverfahren getestet und bzgl. ihres Potentials bewertet werden

**AP3: Modelltechnische Strategie**

Dieses Arbeitspaket beschäftigt sich mit der Entwicklung modelltechnischer Strategien für die Beschreibung des hydromechanischen Salzgrusverhaltens im Bereich kleiner Porosität im Hinblick auf die Nachweisführung für den sicheren Einschluss. In (AP3.1) sollen die Anforderungen an die Prozessmodelle untersucht werden, die sich aus den Bedürfnissen der Nachweisführung für die Langzeitsicherheit ergeben. In (AP3.2) sollen die bestehenden Modellansätze genauer untersucht werden. Wichtig in dem Zusammenhang ist beispielsweise, welche Prozesse nachgebildet werden (können), welchen Einfluss die verschiedenen Parameter haben und in welchen Grenzen die Anwendung überhaupt zulässig ist. Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden an Hand einfacher Simulationsbeispiele ermittelt und dokumentiert. Die Simulation der Salzgruskompaktion mit Prozessmodellen muss belastbare Ergebnisse liefern, aus denen in (AP3.3) die vereinfachten Beziehungen der Langzeitsicherheitsanalyse abgeleitet werden bzw. mit denen diese geprüft werden können.

**AP4: Dokumentation und Synthese**

In AP4 werden die Ergebnisse der übrigen Arbeitspakete dokumentiert und zusammengefasst sowie die Richtung für die systematische Lösung der verbleibenden Fragen festgelegt.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Erstellung des Abschlussberichtes. In diesem Zusammenhang wurden mehrere Skype Besprechungen von den Projektbeteiligten durchgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine. Vorhaben endete zum 31.08.2020.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Abschlussbericht: KOMPASS – Compaction of crushed salt for the safe containment, GRS-608, ISBN 978-3-947685-94-3

<b>Zuwendungsempfänger:</b> IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstr. 60, 04279 Leipzig		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11708C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.08.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 272.341,60 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Popp	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Vorhabens ist die Methoden- und Strategieentwicklung, um die Defizite bei der Prognose der Kompaktion von Salzgrusversatz zu verringern und damit die Voraussetzungen für die Stärkung des Sicherheitsnachweises für ein Endlager im Steinsalz zu schaffen. Dies beinhaltet folgende Teilziele: die Schaffung experimenteller Grundlagen für die Bestimmung von Salzgruseigenschaften im Bereich kleiner Porositäten, die Entwicklung des Prozessverständnisses und die Entwicklung modelltechnischer Strategien zur Ermöglichung einer belastbaren Prognose der Salzgruskompaktion im Hinblick auf den sicheren Einschluss.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in insgesamt drei große Arbeitspakete:

- AP1: Entwicklung und Test experimenteller Methoden zur Untersuchung der Salzgruskompaktion, dabei Einbeziehung von Salzgrus aus flacher Lagerung
- AP2: Verbesserung des Prozessverständnisses, insbesondere durch Gefügeuntersuchungen
- AP3: Analyse der vorhandenen Modellansätze, vergleichende Modellrechnungen und Definition einer Strategie zur Verbesserung

Abschließend erfolgt eine Zusammenstellung des neuen Kenntnisstandes und Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf den sicheren Einschluss.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Vorhaben wurde planmäßig mit der Erstellung des gemeinsamen Abschlussberichts der Projektpartner beendet (Czaikowsky et al., 2020).

Die wichtigsten Ergebnisse aus dem Vorhaben sind folgende:

- Auswahl einer leicht verfügbaren und dauerhaft herstellbaren synthetischen Salzgrusmischung (Steinsalz der flachen Lagerung, in verschiedenen Korngrößenfraktionen aus der Salzgrube Sondershausen), die als Referenzmaterial für zukünftige vergleichende experimentelle Untersuchungen dient.
- Entwicklung verschiedener experimenteller methodischer Laboransätze zur Herstellung vorverdichteten Proben für weitere Untersuchungen („Zeitraffertests“). Am IfG wurde dafür u. a. die „Große IfG-Versatzdruckzelle“ (Probenvolumen ca. 160 l) eingesetzt, mit der im Kurzzeitversuch (ca. 1 Monat) über mehrere Belastungsstufen eine Vorkompaktion bis zu 15 % Restporosität erreicht wurde.
- Etablierung eines Instrumentariums von Mikrostrukturuntersuchungsmethoden zum Nachweis der Vergleichbarkeit der Kornstrukturen von vorverdichteten Proben mit in situ verdichtetem Material für zukünftige Untersuchungen (BGR, Sandia);
- Durchführung verschiedener Laborexperimente mit vorverdichteten Proben, z. B. Langzeit-Kriechversuche (Dauer > 1 Jahr), die verlässliche Informationen über das zeit- und spannungsabhängige Kompaktionsverhalten liefern.
- Entwicklung einer komplexen experimentellen Untersuchungsstrategie zur Ableitung notwendiger Modellparameter unter Berücksichtigung individueller Funktionsabhängigkeiten. Dessen technische Machbarkeit wurde erfolgreich verifiziert.
- Benchmarking mit verschiedenen bestehenden numerischen Modellen unter Verwendung von Datensätzen aus drei verschiedenen triaxialen Langzeitversuchen.
- Das Ergebnis war nicht ganz zufriedenstellend, jedoch ist die Größenordnung der Einflussfaktoren sehr gering und weitere Validierungsarbeiten müssen durchgeführt werden.

Insgesamt hat das Projekt deutliche Fortschritte bei den Lösungsansätzen für die offenen Fragen einer langzeitigen Salzgruskompaktion gebracht.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Geplant ist ab Mitte des Jahres 2021 das Anschlussprojekt „KOMPASS II“ mit den gleichen Projektpartnern.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Czaikowski, O., Friedenber, L., Wiczorek, K., BGE TEC, BGR, IfG, Sandia, TUC (2020): KOMPASS - Compaction of crushed Salt for the safe Containment. GRS Nr.: 608, ISBN 978-3-947685-94-3.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11708D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.08.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 219.111,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Düsterloh	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Methoden- und Strategieentwicklung, um die Defizite bei der Prognose der Kompaktion von Salzgrusversatz zu verringern und damit die Voraussetzungen für die Stärkung des Sicherheitsnachweises für ein Endlager im Steinsalz zu schaffen. Teilziele: Schaffung experimenteller Grundlagen für die Bestimmung von Salzgruseigenschaften im Bereich kleiner Porositäten, Entwicklung des Prozessverständnisses und die Entwicklung modelltechnischer Strategien zur Ermöglichung einer belastbaren Prognose der Salzgruskompaktion im Hinblick auf den sicheren Einschluss.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Entwicklung und Test experimenteller Methoden zur Untersuchung der Salzgruskompaktion, dabei Einbeziehung von Salzgrus aus flacher Lagerung.
- AP2: Verbesserung des Prozessverständnisses, insbesondere durch Gefügeuntersuchungen.
- AP3: Analyse der vorhandenen Modellansätze, vergleichende Modellrechnungen und Definition einer Strategie zur Verbesserung.
- AP4: Erstellung Schlussbericht mit Zusammenstellung des neuen Kenntnisstandes und Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf den sicheren Einschluss.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP4: Erstellung des TUC-Anteils im Abschlussbericht.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine. Vorhaben zum 31.08.2020 beendet.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Abschlussbericht zum Projekt.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11718A</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2018 bis 30.09.2020		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 30.09.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 378.246,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Herold	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Bei der Planung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente (kurz: HAW-Endlager) in Tongesteinsformationen ist der technische Ausbau von Grubenbauen von wesentlicher Bedeutung für den sicheren Betrieb des Endlagers. Aus gebirgsmechanischer Sicht ist die Errichtung und der sichere Betrieb eines HAW-Endlagers im Tongestein ohne einen geeigneten Ausbau nicht möglich. Die Tongesteinseigenschaften (z. B.: geringe bis mäßige Festigkeit, Kriechverhalten, Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit des Wassergehaltes) in Verbindung mit der jeweiligen Teufenlage führen zu hohen Anforderungen an die Tragfähigkeit des verwendeten Ausbausystems.

Die Projektpartner DMT GmbH & Co. KG und BGE TECHNOLOGY GmbH setzen sich zum Ziel, im Vorhaben AGEnT die Anforderungen zur Auslegung von stützenden Ausbauten im Grubengebäude eines Endlagers in Tongestein zusammenzustellen, grundlegende technische Lösungen zu entwickeln und mögliche Wechselwirkungen der dafür in Betracht kommenden Baustoffe mit den anderen Komponenten des Endlagersystems, wie dem Wirtsgestein inkl. Porenwasser, zu untersuchen. Aus dem Spannungsfeld zwischen der Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit während der Einlagerung sowie möglicher Rückholung und dem Nachweis der Langzeitsicherheit sollen die Anforderungen zur Auslegung von Ausbauten im Grubengebäude eines HAW-Endlagers in Tongestein (z. B.: wie im FuE-Vorhaben ERATO oder ANSICHT beschrieben) zusammengestellt und grundlegende technische Lösungen für einen geeigneten Ausbau entwickelt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturrecherche zu Ausbaukonzepten und -materialien
- AP2: Herleitung und Zusammenstellung der Randbedingungen und Anforderungen
- AP3: Ermittlung erforderlicher mechanischer Ausbaueigenschaften zur Gebirgsbeherrschung
- AP4: Erarbeitung von grundlegenden technischen Lösungen für den Ausbau
- AP5: Identifikation von Wechselwirkungen zwischen den ausgewählten Ausbaumaterialien mit dem Gebirge
- AP6: Abschätzungen zum Langzeitverhalten (Alteration) von Beton anhand chemischer Berechnungen unter Annahme einer Referenzlösung für das Wirtsgestein und Abschätzung der mechanischen Funktionsdauer
- AP7: Bestimmung der Anwendungsgrenzen eines neuen Ausbausystems

AP8: Ableitung von notwendigen Entwicklungsarbeiten

AP9: Dokumentation und Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP6: Die beauftragten Arbeiten zur numerischen Abbildung der zu erwartenden Korrosionsprozesse im Baustoff „S5“ (durch DMT entwickelte Referenzrezeptur für das Vorhaben AGenT) wurden im Berichtszeitraum abgeschlossen. Zur Simulation der Korrosion der zementbasierten Baustoffe wurde zur Qualitätssicherung und Absicherung der Ergebnisse ein diversitärer Ansatz gewählt, wobei hier die Codes zum reaktiven Stofftransport MARNIE-CHEMAPP sowie TOUGHREACT zum Einsatz kamen. Die Bereitstellung von thermodynamischen Daten bzw. Datenbasen erfolgte im Rahmen des THEREDA-Projektes. Bei der Umsetzung der Berechnungen zeigte sich vor allem im Umfeld hochsalinärer Lösungen (Rechenfall: Tongestein NORD), dass die nutzbaren Codes Schwächen aufweisen und die Umsetzung stabiler Berechnungen sehr herausfordern sind. Die Modellergebnisse sind trotzdem mit den aus der Literaturrecherche erwarteten Entwicklung vergleichbar und stehen nicht im Widerspruch zu den In-situ-Beobachtungen auf der Schachtanlage Konrad.

AP9: Der Berichtszeitraum war im Wesentlichen von der Erstellung des Abschlussberichtes geprägt. Aufbauend auf der zuvor entwickelten Grobgliederung wurden von beiden Häusern (DMT und BGE TEC) die einzelnen Abschnitte erstellt und in einem Dokument zusammengeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Keine. Vorhaben zum 30.09.2020 beendet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Abschlussbericht

Folgende Abstracts wurden für zukünftige Konferenzen eingereicht:

Tage der Standortauswahl 2021 (11./12.02.2021): P. Herold, E. Simo, H.-J. Engelhardt, H. Räuschel, J. Te Kook, B. Pflüger, C. Scior, A. Studeny, M. Manica, T. Meyer: Ausbau von Grubenbauen für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Tongestein

DAEF-Conference (verschoben auf 2022):

P. Herold, E. Simo, H.-J. Engelhardt, H. Räuschel, M. Manica, T. Meyer: Long-term performance of concrete-based support structures for a high-level radioactive waste repository in claystone

J. te Kook, A. Studeny, B. Pflüger, C. Scior: Support of Underground Openings in a HLW/SF Repository in Clay Stone

<b>Zuwendungsempfänger:</b> DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45307 Essen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11718B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2018 bis 30.09.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 30.09.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 272.458,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. te Kook	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Bei der Planung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente (kurz: HAW-Endlager) in Tongesteinsformationen ist der technische Ausbau von Grubenbauen von wesentlicher Bedeutung für den sicheren Betrieb des Endlagers. Aus gebirgsmechanischer Sicht ist die Errichtung und der sichere Betrieb eines HAW-Endlagers im Tongestein ohne einen geeigneten Ausbau nicht möglich. Die Tongesteinseigenschaften (z. B.: geringe bis mäßige Festigkeit, Kriechverhalten, Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit des Wassergehaltes) in Verbindung mit der jeweiligen Teufenlage führen zu hohen Anforderungen an die Tragfähigkeit des verwendeten Ausbausystems. Die Projektpartner DMT GmbH & Co. KG und BGE TECHNOLOGY GmbH setzen sich zum Ziel, im Vorhaben AGEnT die Anforderungen zur Auslegung von stützenden Ausbauten im Grubengebäude eines Endlagers in Tongestein zusammenzustellen, grundlegende technische Lösungen zu entwickeln und mögliche Wechselwirkungen der dafür in Betracht kommenden Baustoffe mit den anderen Komponenten des Endlagersystems, wie dem Wirtsgestein inkl. Porenwasser, zu untersuchen. Aus dem Spannungsfeld zwischen der Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit während der Einlagerung sowie möglicher Rückholung und dem Nachweis der Langzeitsicherheit sollen die Anforderungen zur Auslegung von Ausbauten im Grubengebäude eines HAW-Endlagers in Tongestein (z. B.: wie im FuE-Vorhaben ERATO oder ANSICHT beschrieben) zusammengestellt und grundlegende technische Lösungen für einen geeigneten Ausbau entwickelt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturrecherche zu Ausbauprozessen und -materialien
- AP2: Herleitung und Zusammenstellung der Randbedingungen und Anforderungen
- AP3: Ermittlung erforderlicher mechanischer Ausbaueigenschaften zur Gebirgsbeherrschung
- AP4: Erarbeitung von grundlegenden technischen Lösungen für den Ausbau
- AP5: Identifikation von Wechselwirkungen zwischen den ausgewählten Ausbaumaterialien mit dem Gebirge
- AP6: Abschätzungen zum Langzeitverhalten (Alteration) von Beton anhand chemischer Berechnungen unter Annahme einer Referenzlösung für das Wirtsgestein und Abschätzung der mechanischen Funktionsdauer
- AP7: Bestimmung der Anwendungsgrenzen eines neuen Ausbausystems
- AP8: Ableitung von notwendigen Entwicklungsarbeiten
- AP9: Dokumentation und Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die zuvor durchgeführten geotechnisch numerischen Modelle haben gezeigt, dass für die langlebigen Hauptstrecken starre geschlossene Ausbausysteme mit extrem hohen Betonfestigkeiten ( $> 100$  MPa) und Ausbaustärken ( $> 75$  cm) insbesondere an ihre Grenzen gelangen, wenn die Teufe mehr als 750 m beträgt, das Gebirge eine einaxiale Druckfestigkeit von 20 MPa oder weniger aufweist und mit Kriechbewegungen des Tongesteins zu rechnen ist. Da sehr hohe Betonfestigkeiten in situ nur mit sehr hohem Aufwand zu realisieren sind, und starre Ausbausysteme unter ungünstigen Bedingungen an ihre Grenzen stoßen, wurde im Berichtshalbjahr abschließend geprüft inwieweit nachgiebige Ausbausysteme diesen Aufwand reduzieren können und den Einsatz von reduzierten Betonfestigkeiten erlauben.

Die hierzu notwendigen geotechnischen Modellrechnungen wurden mittels der Software FLAC 2D durchgeführt. Als Ergebnis dieser Berechnungen hat sich gezeigt, dass der Einsatz von nachgiebigen Ausbausystemen unter gebirgsmechanisch gleichen Randbedingungen im Vergleich zu den Modellen mit starren Ausbausystemen (Teufe, Gesteinsfestigkeit, Kriechverhalten etc.) die Lebensdauer von langlebigen Strecken erhöht bzw. eine Reduktion der erforderlichen Baustofffestigkeit ermöglicht. Es zeigt sich aber auch, dass es Zustände gibt, wo auch diese Systeme an ihre Grenzen kommen. So sind speziell bei ausgeprägtem Kriechverhalten sehr hohe Betonfestigkeiten und Ausbaustärken nötig sind, um die die Standsicherheit des Ausbaus über lange Zeiträume gewährleisten zu können.

Risikobetrachtungen haben gezeigt, dass aus gebirgsmechanischer Sicht bei der Suche nach einem Endlager im Ton/Tonstein darauf geachtet werden sollte, eine Kombination aus verschiedenen „ungünstigen“ Faktoren zu vermeiden. So erhöhen große und/oder ungleichförmige Gebirgsspannungen die Kriechraten, was sich speziell bei kriechfreudigem Ton sehr ungünstig auswirkt. Dies trifft ebenfalls auf geringfeste oder stark durchtrennte Gesteine zu. In diesem Fall wird empfohlen, die Teufe für ein mögliches Endlager zu begrenzen. Trifft man dagegen festere Tone mit geringerer Kriechfreudigkeit an, sind durchaus Teufen für ein Endlager von 1000 m realisierbar.

Abschließend wurden notwendige zukünftige Entwicklungsarbeiten abgeleitet. Diese sind:

- Verbesserung des Kenntnisstandes über Standortbedingungen
- Weiterentwicklung des Tübbingsystems
- Entwicklung einer (low-pH) kompressiblen Hinterfüllung
- Entwicklung eines low-pH Spritzbetons für die Anwendung in kurzlebigen Einlagerungsstrecken
- Entwicklung und Dimensionierung der Streckenkreuze zwischen langlebigen Strecke
- Entwicklung und Dimensionierung der Streckenkreuze zwischen langlebigen und kurzlebigen Strecken

Im Berichtshalbjahr wurde die Entwurfsfassung des gemeinsamen Abschlussberichtes erstellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Der gemeinsame Abschlussbericht (DMT und BGE TEC) wird finalisiert.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11728</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein (KOREKT)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2018 bis 31.12.2020		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 344.016,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Herold	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In Deutschland ist die Möglichkeit zur Rückholung als Auslegungsanforderung an ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente seit dem Jahr 2010 in den Sicherheitsanforderungen des BMU festgelegt und auch im StandAG verankert. Die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen ist Genehmigungsvoraussetzung für die Inbetriebnahme eines solchen Endlagers. Ziel des Vorhabens ist es, aufbauend auf neuentwickelten Einlagerungskonzepten für ein HAW-Endlager im Kristallingestein (FuE-Vorhaben KONEKD), der bereits erfolgten systematischen Überprüfung der Sicherheitsanforderung „Rückholbarkeit“ (FuE-Vorhaben ASTERIX) und unter Einbeziehung der Ergebnisse des FuE-Vorhabens ERNESTA geeignete Rückholungskonzepte für HAW-Endlager in kristallinen Wirtsgesteinen zu entwickeln sowie deren Auswirkungen hinsichtlich Aufwand und Zeitbedarf abzuschätzen. Dies beinhaltet eine vertiefende Planung der Rückholungstechnik. Dabei werden auch die sicherheitstechnischen Konsequenzen und mögliche Auswirkungen der Sicherheitsanforderung „Rückholbarkeit“ auf die Endlagerauslegung verdeutlicht. Die Arbeiten sollen Grundlagen für eine genehmigungsreife technische Lösung für ein Endlager in kristallinen Gesteinsformationen liefern. Für die technische Umsetzung der Rückholung sollen die zwei Einlagerungskonzepte - Streckenlagerung von selbstabschirmenden POLLUX®-Behältern und Bohrlochlagerung von nicht abgeschirmten Kokillen in kurzen vertikalen Bohrlöchern - untersucht werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Grundlagen zur Berücksichtigung einer selektiven Rückholung in der Konzeptentwicklung
- AP2: Entwicklung eines Rückholungskonzepts für das Konzept multipler einschlusswirksamer Gebirgsbereiche
- AP3: Systemverhalten im Innenliner der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung im Konzept multipler einschlusswirksamer Gebirgsbereiche
- AP4: Entwicklung eines Rückholungskonzepts für das Konzept einschlusswirksame Barriere
- AP5: Entwicklung eines Rückholungskonzepts für das Konzept überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereiche
- AP6: Dokumentation und Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP3: Die Arbeiten zur Beurteilung der Spannungsverhältnisse im Innenliner eines Einlagerungsbohrloches wurden weitergeführt. Aus den Erkenntnissen aus den ersten Testmodellen wurde beschlossen, alle weiteren Berechnungen mit FLAC3D umzusetzen. Für eine bessere Abbildung der Interaktion zwischen Liner, Sandfüllung und Kokille wurde ein lokales Modell (halbes Bohrloch, Spiegelung an der Längsachse) abgebildet. Dieses Modell besteht aus dem Bohrloch mit einer Kokille inkl. Sandverfüllung, Liner und umgebenden Gebirge. Dazu wurde die Kontaktfläche zwischen Kokille und Sand mit Hilfe von einem „Interface-Element“ simuliert, um das Ziehen der Kokille abbilden zu können. Anschließend wurde das Ziehen der Kokille simuliert. Hierbei wurde am Kokillenkopf eine Kraft angelegt und schrittweise erhöht, bis im Modell eine „Lockerung“ an der gesamten Kontaktfläche zwischen der Außenwand der Kokille und des Sandes festzustellen war. Die ermittelten Kräfte stimmen mit den analytischen Lösungsansätzen überein.

Ergänzend zum Ansatz der Pfahltheorie wurden die analytischen Ansätze der Erddrucktheorie und der Silotheorie angewendet. Beide Ansätze nutzen geotechnische Parameter des Erdreichs bzw. Schüttgutes. Im Vergleich aller drei Ansätze und auch im Vergleich mit dem numerischen Modell zeigte der Ansatz der Erddrucktheorie die beste Übereinstimmung. Ergänzend dazu wurde der Ansatz genutzt, um über eine Variation der Parameter (bzw. der Eigenschaften des Sandes) eine Sensitivitätsanalyse des Systems durchzuführen. Der analytische Ansatz wurde auch genutzt, um die Auswirkungen einer konischen Außenform der Kokille zu bewerten. Die ermittelte Reduzierung der benötigten Zugkraft liegt bei nur ca. 1 % der Zugkraft für eine zylindrische Kokille. Dies begründet sich aus der vergleichsweise geringen Ausprägung der Kegelform an der Kokille. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird empfohlen, die konische Außenform der Kokille nicht weiter zu betrachten, da der erhoffte Nutzen klein ist und die erwarteten Nachteile (z. B. aufwändigere Herstellung der Kokille und umfangreicheres, technisches Design der Transferbehälter) nicht aufwiegt.

AP4: Aus anderen internationalen Endlagerprojekten bekannte technische Ansätze zur Rückholung von mit Bentonit umschlossenen Behältern in Bohrlöchern wurden für das deutsche „modifizierte KBS-3 Konzept“ als ungeeignet bewertet. Zum einen erschwert der vorgesehene Ca-Bentonit das hydrodynamische Lösen durch eine Salzlösung. Zum anderen wird eingeschätzt, dass der damit verbundene technische Aufwand nicht im Einklang mit der EndlSiAnfV und der Forderung „*dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den für die Einlagerung erforderlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt.*“ Als Alternativen wurden im Vorhaben mechanische Verfahren zum Lösen des Buffers identifiziert. Mögliche Ansätze sind das Lösen und Fördern des Bentonits mittels Saugbagger oder das Überbohren der gesamten Kokille mit einer Hohlschnecke. Entsprechende technische Ansätze und grundsätzlich geeignete Technik wurden beschrieben. Parallel zur Beschreibung der technischen Konzepte wurden auch die erwarteten Eigenschaften des Bentonitbuffers auf Grundlage einer Literaturrecherche noch einmal genauer beschrieben. Da der Bentonit mit einem geringen Wassergehalt aber hoher Anfangssättigung eingebaut wird, bleibt die zusätzliche Wasseraufnahme bis zur vollständigen Sättigung ebenso gering. Grundlegende Änderungen der Konsistenz sind damit im Einbauzustand nicht zu erwarten. Während der Rückholung wird die Einspannung des Bentonits reduziert und eine Volumenzunahme zur freien Oberfläche ist möglich. Dies kann lokal zu einem Übergang von einer halbfesten zu einer eher plastischen Konsistenz führen. Die genannten technischen Lösungen können aber auch unter diesen Bedingungen eingesetzt werden.

AP6: Die Erstellung des Abschlussberichtes wurde im Berichtszeitraum weitergeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Keine. Vorhabenende zum 31.12.2020.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11748A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2019 bis 30.06.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.582.898,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Langefeld	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das übergeordnete Ziel dieses Vorhabens ist es, den Verschluss von hochradioaktiven Abfällen in einem Bergwerk sicher zu gestalten. Die Kenntnisse zur Verdichtung der Auflockerungszonen im Kontaktbereich zwischen Wirtsgestein und Dammbauwerk sind von Bedeutung, um eine sichere Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im salinaren Milieu gewährleisten zu können.

Vorausgegangen sind diesem Projekt die „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung– Phase I (Konzeption von Funktionsnachweis und Abdichtungsmethoden, Testung und Auswahl von Behandlungsfluiden)“ mit dem FKZ 02E11253 sowie der „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches – Phase II (Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel) mit dem FKZ 02E11597. Diese Projekte lieferten das Basiswissen, auf welchem in diesem Projekt aufgebaut wird.

Im Rahmen dieses Projektes wird die In-situ-Testung des Konzeptes für eine gegenständliche Nachweisführung der strömungstechnischen Dichtwirkung eines Bauwerkes in der vierten Projektphase vorbereitet. Das Nachweiskonzept ist prinzipiell für verschiedene Wirtsgesteine geeignet. Entsprechend der Ausrichtung der Untersuchungen in den ersten beiden Projektphasen und dem Bezug zu den deutschen Endlagern im Salinargebirge werden die Untersuchungen in der dritten Projektphase ebenfalls auf Verschlussbauwerke im Salinargebirge ausgerichtet.

Folgende Untersuchungen sollen in diesem Projekt vor Ort durchgeführt und weitere Erkenntnisse gewonnen werden:

- geophysikalische Untersuchungen zur Beurteilung der differenzierten Vorgänge und Parameterverteilung im Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge
- Entwicklung und Testung ausgewählter Komponenten und Materialien eines In-situ-Versuches im halbertechnischen Maßstab -> u. a. Ringkammern, Bohrungsführung, Mehrfachpacker
- Auswahl, Parametrisierung und Vorgaben zur Qualitätssicherung für d. Einbau d. Dichtbaustoffes.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Kontaktbereich – Vertiefung Kenntnisstand

Durch Laboruntersuchungen soll der Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge genauer untersucht werden.

AP2: Materialuntersuchungen

In Abhängigkeit von den Randbedingungen, wie das geochemische Milieu oder der zu injizierende Porenraum, werden unterschiedliche Injektionsmittel auf Ihre Verwendbarkeit getestet.

AP3: Vorversuche zur Konzipierung der Versuchsinstallation

Die Voruntersuchungen beinhalten die Konzipierung, den Bau und die Testung von Installationskomponenten und die vorbereitende Klärung von Detailfragen für die Installation, Testung und Prozessbeurteilung.

AP4: In-situ-Voruntersuchungen

Die Erkenntnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen werden in diesem Arbeitspaket aufgegriffen und dienen als Grundlage für die Durchführung von Handhabungs- und vereinfachten Referenzversuchen an einem in situ errichteten Segment eines Dammbauwerkes.

AP5: Berichtslegung – Dokumentation, Interpretation, Schlussfolgerungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Sorelzement wurde in 300 mm Bohrlöcher im Gebirge eingegossen. Nachdem diese Proben ausgehärtet waren, wurde der Kontaktbereich zwischen Dichtbaustoff und Gebirge überbohrt und Kernbohrungen, bestehend aus Steinsalz und Sorelzement gewonnen. Die Permeabilität von diesen Kernbohrungen wird zurzeit ermittelt.

Des Weiteren werden Steinsalzbohrkernhälften, die durch Spaltzugversuche halbiert worden sind, in hohle PVC-Rohre gelegt, deren Innendurchmesser den Durchmesser der Salzproben entspricht. Anschließend wurde die fehlende Innenraumhälfte mit Sorelzement ausgegossen und das Rohr entsprechend verschlossen. Auch hier wird die Permeabilität zurzeit ermittelt.

AP2: Aufgrund neuer Erkenntnisse soll als partikelgestütztes Injektionsmittel der MFBBa verwendet werden. Bei der Beschaffung des Injektionsmittels gibt es Probleme bezüglich der Qualitätssicherung. Aus diesem Grund wurden noch keine Injektionsversuche durchgeführt.

AP3: Ein Verlegeschema für die Injektionsleitungen unter Berücksichtigung der Installation der Ringkammern sowie der sich aus der Halbdamm-Geometrie ergebenden Randbedingungen wurde entwickelt. Die Funktion von den Ringkammern und Injektionsleitungen wurden in Betonkörpern getestet. Dichtheitstest wurden an den Prototypen durchgeführt, Schwachstellen des Systems identifiziert und verbessert. Ein geeignetes Überbohrverfahren zum Rückbau von Kunststoffrohren wurde im Bauwerk getestet und optimiert.

AP4: Um zu überprüfen, ob die Verwendung einer Oberflächenbewehrung zur Reduzierung von Dehnungsrissen an der Betonoberfläche beiträgt, wurden in Teutschenthal zwei Betonblöcke gegossen. An je einem Tag wurde die Hälfte der angestrebten Gesamthöhe gegossen. Visuell konnte hierbei festgestellt werden, dass bei dem Betonblock, bei welchem die Oberflächenbewehrung eingebracht worden ist, eine Reduktion der oberflächennahen Schädigungen aufgetreten ist.

Eine Probebohrung entlang der Kontaktfuge des ersten Blockes wies keine Schädigung innerhalb des Baustoffes auf. Der Bohrkern jedoch wies eine klare Trennung der beiden Sorelzementlagen auf. Eine Abdichtung, welche die Fuge zwischen den beiden Lagen abdichtet, ist nicht vorhanden.

Um mögliche auftretende Überstandsflüssigkeit besser abzubinden, wurde der Feinsalzanteil in der Salzmischung, welche aus drei unterschiedlichen Korngrößenfraktionen besteht, erhöht.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

An den im PVC-Rohr hergestellten Proben werden Permeabilitätstest und Injektionstests durchgeführt, um das am besten geeignete Injektionsmittel zu ermitteln.

Die Errichtung des Dammes erfolgt Anfang März. Nachdem der Kontaktbereich mithilfe von Injektionen abgedichtet worden ist, sollen Probebohrungen in diesen Bereich gestoßen und untersucht werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11748B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2019 bis 31.12.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 39.015,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Kulenkampff	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das übergeordnete Ziel dieses Verbundvorhabens ist es, der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Deutschland ein Stück näher zu kommen. Die Kenntnisse zur Verdichtung der Auflockerungszonen im Kontaktbereich zwischen Wirtgestein und Dammbauwerk sind elementar um eine sichere Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im salinaren Milieu gewährleisten zu können.

Dieses Projekt baut auf die Ergebnisse zweier Projekte der TU Clausthal auf: „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung– Phase I (Konzeption von Funktionsnachweis und Abdichtungsmethoden, Testung und Auswahl von Behandlungsfluiden)“ (02E11253) sowie der „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches- Phase II (Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel) (02E11597).

Im Rahmen dieses Projektes wird die In-situ-Testung des Konzeptes für eine gegenständliche Nachweisführung der strömungstechnischen Dichtwirkung eines Bauwerkes in der vierten Projektphase vorbereitet. Das Nachweis-konzept ist prinzipiell für verschiedene Wirtsgesteine geeignet. Entsprechend der Ausrichtung der Untersuchungen in den ersten beiden Projektphasen und dem Bezug zu den deutschen Endlagern im Salinargebirge werden die Untersuchungen in der dritten Projektphase ebenfalls auf Verschlussbauwerke im Salinargebirge ausgerichtet.

Folgende Untersuchungen sollen in diesem Projekt vor Ort durchgeführt und weitere Erkenntnisse gewonnen werden:

- geophysikalische Untersuchungen zur Beurteilung der differenzierten Vorgänge und Parameterverteilung im Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge,
- Entwicklung und Testung ausgewählter Komponenten und Materialien eines In-situ-Versuches im halbtechnischen Maßstab -> u. a. Ringkammern, Bohrungsführung, Mehrfachpacker,
- Auswahl, Parametrisierung und Vorgaben zur Qualitätssicherung für den Einbau des Dichtbaustoffes.

Das Teilprojekt des HZDR fokussiert auf die Materialdurchlässigkeit als den entscheidenden Parameter. Aus dem Vergleich von Porenradienverteilungen aus 3D-bildgebenden Verfahren ( $\mu$ CT) und Hg-Porosimetrie werden robuste Verfahren und Modelle entwickelt, die eine quantitativ zuverlässige Bewertung der strömungswirksamen Porosität des Materials ermöglichen.

## **2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete**

- AP1: Kontaktbereich – Vertiefung Kenntnisstand  
Durch Laboruntersuchungen soll der Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge genauer untersucht werden.
- AP2: Materialuntersuchungen  
In Abhängigkeit von den Randbedingungen wie das geochemische Milieu, der zu injizierende Porenraum werden unterschiedliche Injektionsmittel auf Ihre Verwendbarkeit getestet werden.
- AP3: Vorversuche zur Konzipierung der Versuchsanstallation  
Die Voruntersuchungen beinhalten die Konzipierung, den Bau und die Testung von Installationskomponenten und die vorbereitende Klärung von Detailfragen für die Installation, Testung und Prozessbeurteilung.
- AP4: In-situ-Voruntersuchungen  
Die Erkenntnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen werden in diesem Arbeitspaket aufgegriffen und dienen als Grundlage für die Durchführung von Handhabungs- und vereinfachten Referenzversuchen an einem in situ errichteten Segment eines Dammbauwerkes.
- AP5: Berichtslegung – Dokumentation, Interpretation, Schlussfolgerungen

## **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- AP1: Die Radienverteilungen des Wirtsgesteins aus  $\mu$ CT und MIP konnten in Zusammenarbeit mit dem Partner IBeWa abgeglichen werden. Dies erlaubte eine Neuinterpretation transportwirksamen Porosität. Aus MIP vermutete größere Poren als ca. 30  $\mu$ m konnten nicht nachgewiesen werden.

## **4. Geplante Weiterarbeiten**

Sobald Proben aus dem Bauwerksmaterial im Frühjahr 2021 zur Verfügung stehen, werden sie mit Hilfe des bewährten Verfahrens untersucht.

## **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11749</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (TREND)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1+3.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2019 bis 28.02.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 563.242,17 EUR	<b>Projektleiter:</b> Bertrams	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist es, die Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik für verschiedene Abfallgebinde in unterschiedlichen Endlagerkonzepten auf einen vergleichbaren Entwicklungsstand zu bringen. Im Ergebnis soll ein weitestgehend homogener Entwicklungsstand der Transport- und Einlagerungstechnik über die verschiedenen Kombinationen von Einlagerungskonzepten und Wirtsgesteinen hinweg erreicht werden.

Die Planungen der existierenden und erprobten Technik für die Streckenlagerung von POL-LUX®-Behältern (F&E Programm DEAB) und die vertikale Bohrlochlagerung von Brennstabkernen in Salz (F&E Vorhaben DENKMAL) sind hinsichtlich des Standes der Technik zu überprüfen und ggf. weiter zu entwickeln. Die bisherige Konzeptidee zur horizontalen Bohrlochlagerung aus dem F&E Vorhaben KOSINA soll deutlich weiterentwickelt werden, so dass wesentliche Maße und technische Daten der Technik zur Verfügung stehen. Im Bereich der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehälter ist eine Weiterentwicklung durchzuführen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Grundlagen
- AP2: Einlagerungskonzept: Horizontale Kurzbohrlochlagerung von Transport- und Lagerbehältern
- AP3: Einlagerungskonzept: Streckenlagerung
- AP4: Einlagerungskonzept: Vertikale Bohrlochlagerung
- AP5: Einlagerungskonzept: Horizontale Bohrlochlagerung
- AP6: Dokumentation und Abschlussbericht

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Innerhalb des Berichtszeitraums wurden die Arbeiten zu den AP3, 4 und 5 abgeschlossen. Die Arbeiten zu AP6 befinden sich in der Schlussphase.

Innerhalb von AP3 wurde auf der Basis des Anforderungskatalogs/Lastenhefts und der erarbeiteten konzeptionellen Lösung konstruiert. Im Gegensatz zum Zeitpunkt der Entwicklung der Einlagerungsvorrichtung in Strecken im Vorhaben DEAB (1995) sind heute Portalkräne Stand der Technik, so dass sich die Übernahme von Konstruktionsansätzen aus der Industrie angeboten hat. Die Konstruktion wurde durch eine Risikobeurteilung begleitet. Der Einlagerungsvorgang wurde animiert.

In AP4 wurde eine alternative Lösung für die Einlagerung ohne Bohrlochkeller konstruiert. Diese sieht eine kombinierte Transport- und Einlagerungsvorrichtung vor, die den Transferbehälter in die Vertikale kippt. Die Abschirmhaube zur Seilführung ist dabei in den Transferbehälter integriert. Der Transferbehälter wird damit zu einem Bestandteil der Einlagerungsvorrichtung. Die Entwicklungen wurden durch eine Risikobeurteilung begleitet. Der Einlagerungsvorgang der Einlagerung in vertikale Bohrlöcher wurde animiert.

In AP5 wurde einerseits die Risikobeurteilung abgeschlossen, andererseits wurde der Prozess der Einlagerung animiert.

Die Arbeiten wurden während der Bearbeitung dokumentiert und in einem Entwurf des Abschlussberichtes zusammengefügt (AP6).

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Kleinere grafische Fehler in den Animationsvideos werden noch bearbeitet. Die Dokumentation einzelner Arbeiten (Risikobeurteilung und Konstruktionsbeschreibung in AP3) steht noch aus. Mit ihr wird der Abschlussbericht fertiggestellt und in die interne Freigabe gegeben.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11759A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 30.04.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 375.308,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schäfer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Hauptziel des Vorhabens ist es, das mechanistische Verständnis der Prozesse weiter zu vertiefen, die unter naturnahen, endlagerrelevanten Bedingungen in geklüfteten Granitsystemen die Integrität der Bentonitbarriere beeinträchtigen und zu einem kolloidgetragenen Radionuklid (RN)-Transport führen können. Dies umfasst die grundlegenden Mechanismen der Bentoniterosion und Kolloidbildung am Übergang des Bentonit-Versatzes/-Puffers zum Kristallingestein, die RN-Speziation, insbesondere die Wechselwirkungen zwischen RNs und Kolloiden sowie die Wechselwirkungen von gelösten RN und/oder Kolloiden mit den Gesteinsoberflächen. Die geplanten Arbeiten bauen auf den in Kollorado-e2 erzielten Erkenntnissen auf.

Das experimentelle Programm im Labor und im Untertagelabor Grimsel unter Anwendung von spektroskopischen und mikroskopischen Methoden der Partner FSU und KIT-INE soll dazu beitragen, ein verbessertes mechanistisches Verständnis der Integrität der Bentonitbarriere und des kolloidgetragenen RN-Transports zu erreichen. Es soll die Übertragbarkeit der Labordaten auf natürliche Systeme überprüft und Eingangsdaten für die in der Langzeitsicherheitsanalyse von GRS verwendeten Codes CLAY-POS, COFRAME und  $d^3f^{++}$  ermittelt werden. Diese Codes sowie von KIT-INE und FSU genutzte gekoppelte reaktive Transportmodelle werden zur Beschreibung der Feldexperimente weiterentwickelt, angewandt und damit weiter qualifiziert.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Experimentelles Programm zum kolloidgetragenen RN-Transport (KIT, FSU)
- AP1.1: Radionuklidtransport in kompaktiertem Bentonit
- AP1.2: Integrität der Bentonitbarriere
- AP1.3: Kolloidgetragener Radionuklidtransport
- AP2: Modellrechnungen zum kolloidgetragenen RN-Transport (GRS, KIT, FSU)
- AP2.1: Benchmarkrechnungen zu thermodynamischen Daten (GRS, KIT, FSU)
- AP2.2: Simulationsrechnungen für das CFM Experiment LIT und Mock-Up Tests (GRS)
- AP2.3: Simulationsrechnungen für bisherige und weitere CFM Feldexperimente (GRS)
- AP2.4: Modellrechnungen/Bewertung des kolloidgetragenen RN Transports (GRS)
- AP3: Integration der Ergebnisse und Abschlussdokumentation (GRS, KIT, FSU)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Die Aufbereitung und Na-Homoionisierung der Tonmineralfraktion der verschiedenen Bentonite (Febex, MX-80) zur Untersuchung des Einflusses akzessorischer Gemengteile auf die Bentonit-Erosion wurde erfolgreich durchgeführt. Die Konstruktion von neuen Erosionszellen mit 1 mm Apertur wurde in Kollaboration mit dem Partner KIT-INE abgeschlossen. Vier verschiedene Proben-Tabletten (1x MX-80 Roh-Bentonit; 3x aufgereinigter Na-Montmorillonit mit einer gezielten Zugabe von akzessorischem Quarzmehl (10 Gew. %, 20 Gew. %) mit einer Trockendichte von  $1.8 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$  wurden hergestellt. Erosionsexperimente zu dem MX-80 Material wurden durchgeführt bzw. laufen momentan zum Teil noch. Dabei wurde ein maximaler Druck von 2.18 MPa für die 100 % aufgereinigte Na-Montmorillonit-Probe gemessen. Ein räumlich aufgelöster Kontaktdruck (Gesamtdruck/Kontaktfläche) konnte mit 0.96 MPa (100 % Na-Montmorillonit), 0.74 MPa (90 % Na-Montmorillonit) und 0.49 MPa (80 % Na-Montmorillonit) ermittelt werden. Durch das transparente Design der Messzelle ist das zeitliche Quellverhalten parallel zu den orts aufgelösten Druckdaten kontinuierlich aufgezeichnet. Die Kontaktlösungen wurden durch kontinuierliche Probenahme aufgefangen und stehen zur weiteren chemischen und Kolloid-Analytik zur Verfügung. Es zeigte sich unter den gegebenen Bedingungen eine nahezu quantitative Auswaschung des Materials.

Weiterhin kontinuierliche Probennahme im i-BET Experiment im Rahmen des CFM-Projekts zum Erosionsverhalten von Bara Kade (MX-80) Bentonit und Durchführung sowie Auswertung nasschemischer (ICP-MS, IC) und Kolloidanalysen speziell mittels Nanopartikel-Tracking-Analyse (NTA).

Die geplante Probennahme-Strategie des LIT-Bohrkernes verzögerte sich durch den Bau einer geeigneten Säge und dem Zugang zum Felslabor. Ein erstes geschnittenes Segment des Bohrkerns ist nach Dosisleistungsbestimmung durch PSI an das KIT-INE versandt worden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Quantitative Charakterisierung der Erosion des im i-BET-Experiments eingesetzten MX-80 Montmorillonits (speziell zur gravimetrischen Erosion). Fortführung der Labor-Erosionsexperimente zum Einfluss von akzessorischen Gemengteilen. Substitution des Quarzmehls durch Ca-Träger unterschiedlicher Löslichkeit und Vergleich zu Ca-führendem Kontaktwasser. Durchführung der Erosionsexperimente mit Fokus auf in situ und post-mortem Analysen des Quellverhaltens, des partiell aufgelösten Quelldrucks unter Verwendung verschiedener Tekscan™-Drucksensor-Systeme und der Kolloidentstehung mittels NTA sowie weiterer nasschemischer Analysen.

Nach Erhalt von Sub-Samples des geschnittenen LIT-Experiment Kerns (Febex-Bentonit) Untersuchung der Expansionslänge mittels XRM sowie eine mineralogische Charakterisierung der Ton-Gelschicht und dessen mögliche Transformation mittels LA-ICP-MS.

AP2: Die Einreichung zweier Manuskripte der thermodynamischen Simulationsrechnungen (national & international) verzögerte sich und ist nun für die erste Jahreshälfte 2021 geplant.

AP3: Zur Koordination wurden mehrere bilaterale online Besprechungen durchgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Noseck, Schäfer, et al. (2020): Integrity of the bentonite barrier for the retention of radionuclides in crystalline host rock - experiments and modeling - (Project KOLLORADO-e2; Final report); KIT scientific report 7757. KIT, Karlsruhe

Seher, H., H. Geckeis, T. Fanghänel, T. Schäfer (2020): Bentonite Nanoparticle Stability and the Effect of Fulvic Acids: Experiments and Modelling, *Colloids Interfaces*, 4(2), 16

Huber, F. M., D. Leone, M. Trumm, L. Moreno, I. Neretnieks, A. Wenka, T. Schäfer (2020 in review): Impact of fracture geometry on bentonite erosion - a numerical study, *Int. J Rock Mech. Min.*

Bouby, M., S. Kraft, S. Kuschel, F. W. Geyer, S. Moisei-Rabung, T. Schäfer, H. Geckeis (2020): Erosion dynamics of compacted raw or homoionic MX80 bentonite in a low ionic strength synthetic water under quasi-stagnant flow conditions. *Applied Clay Science* 198, 105797

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11759B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 30.04.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 371.183,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Marquardt	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Hauptziel des Vorhabens ist es, das mechanistische Verständnis der Prozesse weiter zu vertiefen, die unter naturnahen, endlagerrelevanten Bedingungen in geklüfteten Granitsystemen die Integrität der Bentonitbarriere beeinträchtigen und zu einem kolloidgetragenen Radionuklid (RN)-Transport führen können. Dies umfasst die grundlegenden Mechanismen der Bentoniterosion und Kolloidbildung am Übergang des Bentonit-Versatzes/Puffers zum Kristallingestein, die RN-Speziation, insbesondere die Wechselwirkungen zwischen RNs und Kolloiden sowie die Wechselwirkungen von gelösten RN und/oder Kolloiden mit den Gesteinsoberflächen. Die geplanten Arbeiten bauen auf den in Kollorado-e2 erzielten Erkenntnissen auf.

Das experimentelle Programm im Labor und im Untertagelabor Grimsel unter Anwendung von spektroskopischen und mikroskopischen Methoden der Partner FSU und KIT-INE soll dazu beitragen, ein verbessertes mechanistisches Verständnis der Integrität der Bentonitbarriere und des kolloidgetragenen RN-Transports zu erreichen. Es soll die Übertragbarkeit der Labordaten auf natürliche Systeme überprüft und Eingangsdaten für die in der Langzeitsicherheitsanalyse von GRS verwendeten Codes CLAYPOS, COFRAME und  $d^{3f++}$  ermittelt werden. Diese Codes sowie von KIT-INE und FSU genutzte gekoppelte reaktive Transportmodelle werden zur Beschreibung der Feldexperimente weiterentwickelt, angewandt und damit weiter qualifiziert.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Experimentelles Programm zum kolloidgetragenen RN-Transport (KIT, FSU)
  - AP1.1: Radionuklidtransport in kompaktiertem Bentonit
  - AP1.2: Integrität der Bentonitbarriere
  - AP1.3: Kolloidgetragener Radionuklidtransport
- AP2: Modellrechnungen zum kolloidgetragenen RN-Transport (GRS, KIT, FSU)
  - AP2.1: Benchmarkrechnungen zu thermodynamischen Daten (GRS, KIT, FSU)
  - AP2.2: Simulationsrechnungen für das CFM Experiment LIT und Mock-Up Tests (GRS)
  - AP2.3: Simulationsrechnungen für bisherige und weitere CFM Feldexperimente (GRS)
  - AP2.4: Modellrechnungen/Bewertung des kolloidgetragenen RN Transports (GRS)
- AP3: Integration der Ergebnisse und Abschlussdokumentation (GRS, KIT, FSU)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### *LIT-Mock-up-Experimente mit Schwerpunkt auf der Probenanalyse*

Aus dem inaktiven LIT-Mock-up-Experiment wurde durch Bohren von oben durch das Plexiglas Proben entnommen. Die Proben der Bentonit-Gelstruktur wurden mit einem Spatel gesammelt, während die Proben von ca. 10 mm Durchmesser aus dem Ring überbohrt wurden. Nach der Entnahme von 10 Proben (Gel 6 Stück und Ring 4 Stück) wurde die Plexiglasbox, nachdem die Bentonit-Gel-Struktur getrocknet war, geöffnet. Hierbei wurden Bilder mit einem Mikroskop (Auflösung von 200  $\mu\text{m}$ ) aufgenommen, um die Verteilung der farblich unterschiedlichen Mineralien zu dokumentieren. Grobe Körner größerer akzessorischer Mineralien verschiedener Farben wurden für SEM-EDX-Messungen aus den Proben entnommen. Diese Proben wurden auch mittels XRD und FTIR weiter analysiert, um ihre mineralogische Zusammensetzung zu charakterisieren. Die Auswertungen dauern noch an.

In Vorbereitung auf die erste Testphase der Laserablation gekoppelt an die ICP-MS (LA-ICP-MS) wurden die bestehenden technischen Probleme der Softwaresteuerung zwischen Laserablation und ICP-MS angegangen.

#### *Analyse von Grimsel-Grundwasserproben mittels AMS, um den Durchbruch der Radionuklid-Tracer $^{233}\text{U}$ , $^{237}\text{Np}$ , $^{242}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ und $^{99}\text{Tc}$ im In-situ-LIT Experiment zu überprüfen*

In Grundwasserproben aus dem In-situ-LIT-Experiment wurden die Konzentrationen der Radionuklid-Tracer  $^{233}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Am}$  mittels AMS bestimmt. Bereits früher wurde  $^{99}\text{Tc}$  analysiert. Die Analysendaten zeigen eine Signatur auf, die sowohl auf einen Untergrund durch frühere In-situ-Experimente hinweisen, aber auch einen unerwartet frühen Austrag geringer Anteile einiger Radionuklid-Tracer aus dem Bentonitring anzeigen. Eine entsprechende Publikation ist in Vorbereitung.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die erste LIT Probe, die aus einer Scheibe des Granodiorit-Kerns (30 cm Durchmesser und 3 cm Dicke) besteht und einen Bentonit-Ring enthält, wird Ende Januar im INE erwartet. Diese Probe wurde am einen Ende des LIT-Kerns, weit entfernt von der Zone, die die sorbierten Actiniden enthält, herausgeschnitten. Die Probe dient zum Testen der Probennahmeprozedur und der Analyse des zukünftigen radionuklidhaltigen Kerns. Als Analysemethoden werden SEM-EDX, XRD und FTIR verwendet werden, um Hintergrunddaten zur Mineral- und Elementverteilung zu erhalten. Diese Daten werden dann mit den LIT-Proben verglichen, die die radioaktiven Tracer enthalten. Die Proben aus dem LIT-Mock-up-Experiment sowie von der inaktiven LIT Scheibe werden zudem chemisch aufgeschlossen und mittels ICP-MS analysiert, um weitere Informationen über ihre chemische Zusammensetzung zu erhalten.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11759C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 30.04.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 291.340,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Noseck	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Hauptziel des Vorhabens ist es, das mechanistische Verständnis der Prozesse weiter zu vertiefen, die unter naturnahen, endlagerrelevanten Bedingungen in geklüfteten Granitsystemen die Integrität der Bentonitbarriere beeinträchtigen und zu einem kolloidgetragenen Radionuklid (RN)-Transport führen können. Dies umfasst die grundlegenden Mechanismen der Bentonitrosion und Kolloidbildung am Übergang des Bentonit- Versatzes/Puffers zum Kristallgestein, die RN-Speziation, insbesondere die Wechselwirkungen zwischen RNs und Kolloiden sowie die Wechselwirkungen von gelösten RN und/oder Kolloiden mit den Gesteinsoberflächen. Die geplanten Arbeiten bauen auf den in Kolorado-e2 erzielten Erkenntnissen auf. Das experimentelle Programm im Labor und im Untertagelabor Grimsel unter Anwendung von spektroskopischen und mikroskopischen Methoden der Partner FSU und KIT-INE soll dazu beitragen, ein verbessertes mechanistisches Verständnis der Integrität der Bentonitbarriere und des kolloidgetragenen RN-Transports zu erreichen. Es soll die Übertragbarkeit der Labordaten auf natürliche Systeme überprüft und Eingangsdaten für die in der Langzeitsicherheitsanalyse von GRS verwendeten Codes CLAYPOS, COFRAME und  $d^3f^{++}$  ermittelt werden. Diese Codes sowie von KIT-INE und FSU genutzte gekoppelte reaktive Transportmodelle werden zur Beschreibung der Feldexperimente weiterentwickelt, angewandt und damit weiter qualifiziert.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Experimentelles Programm zum kolloidgetragenen RN-Transport (KIT, FSU)
  - AP1.1: Radionuklidtransport in kompaktiertem Bentonit
  - AP1.2: Integrität der Bentonitbarriere
  - AP1.3: Kolloidgetragener Radionuklidtransport
- AP2: Modellrechnungen zum kolloidgetragenen RN-Transport (GRS, KIT, FSU)
  - AP2.1: Benchmarkrechnungen zu thermodynamischen Daten (GRS, KIT, FSU)
  - AP2.2: Simulationsrechnungen für das CFM Experiment LIT und Mock-Up Tests (GRS)
  - AP2.3: Simulationsrechnungen für bisherige und weitere CFM Feldexperimente (GRS)
  - AP2.4: Modellrechnungen/Bewertung des kolloidgetragenen RN Transports (GRS)
- AP3: Integration der Ergebnisse und Abschlussdokumentation (GRS, KIT, FSU)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Dokumentation der Ergebnisse der thermodynamischen Benchmarkrechnungen von den Partnern FSU, GRS, KIT-INE, UJV, JAERI, RWM, CIEMAT and KAERI zur Veröffentlichung in Applied Geochemistry.  
Erstellung eines 2D-Modells für die relevanten geochemischen Nahfeldprozesse im Bentonit und in der angrenzenden Störungszone im Kristallin. Überführung eines großräumigen Modells in ein Detailmodell. Durchführung von Strömungs- und Transportrechnungen mit dem Rechenprogramm PHAST zu den gekoppelten Prozessen im Nahbereich des LIT-Experiments. Auswertung der zeitlichen Verläufe der Konzentrationen von  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$ , im Bentonit am Übergang zur Kluft in der Störungszone und im Bereich der Beobachtungsbohrlöcher.  
Zusammenstellung und Bewertung der für Strömung und Transport relevanten Parameter im Fernfeld eines potentiellen Endlagersystems im Kristallin in Deutschland. Aufbau eines Transportmodells für den Code COFRAME.
- AP3: Teilnahme am virtuellen CFM Partner Meeting mit Vorstellung des aktuellen Stands zu den thermodynamischen Benchmarkrechnungen und Planung der weiteren Auswertung und begleitender Modellrechnungen zum überbohrten LIT-Experiment.  
Durchführung von Arbeitstreffen mit FSU zur Diskussion des Stands der Dokumentation der thermodynamischen Benchmarkrechnungen, Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse zu den Modellrechnungen zu Transport und Geochemie im Nahfeld des LIT und korrespondierender Laborexperimente bei FSU.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Veröffentlichung der Ergebnisse der thermodynamischen Benchmarkrechnungen der internationalen Partner aus CFM in Applied Geochemistry.  
Überprüfung und Adaption der Vorhersagerechnungen zur Diffusion im Bentonit anhand von Elementverteilungen im LIT-Bohrkern, sobald die Ergebnisse vorliegen.  
Durchführung von Transportrechnungen zum kolloidgetragenen RN-Transport für ein potenzielles deutsches Endlagersystem und Weiterführung von Modellrechnungen mit PHAST zu gekoppelten Prozessen im Nahbereich des LIT-Experiments: Parametervariationen und Berücksichtigung von Heterogenitäten in hydraulischen Parametern.
- AP3: Durchführung weiterer Projekttreffen zum Austausch von Ergebnissen und Koordination der Arbeiten mit den Partnern von FSU und KIT-INE.  
Abschließendes Treffen mit allen beteiligten Partnern FSU, GRS, KIT-INE, UJV, JAERI, RWM, CIEMAT and KAERI zur Finalisierung der Veröffentlichung der Thermodynamischen Benchmarkrechnungen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

M. Chemnitius: Simulationsrechnungen zu geochemischen und Transport-Prozessen im Nahbereich einer Bentonitbarriere in einem Feldexperiment im Felslabor Grimsel, Schweiz. Masterarbeit, Georg-August-Universität Göttingen, 17.01.2021

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11769A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 31.10.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.409.542,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Gruner	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der MgO-Beton D4 ist in zukünftigen HAW-Endlagern als Widerlagermaterial mit Abdichtfunktion für Schachtverschlüsse (in Ortbeton) und für Streckenverschlüsse (in Spritzbeton) sowohl im Steinsalz als auch im Anhydrit potentiell einsetzbar. Das Vorhaben MgO-S3 schafft wissenschaftliche und technische Voraussetzungen für die Konzeption und den Bau von Streckenverschlussbauwerken aus MgO-Spritzbeton, die für eine genehmigungsfähige Errichtung zukünftiger Streckenverschlussbauwerke aus MgO-Spritzbeton in zukünftigen HAW-Endlagern im Steinsalz genutzt werden können. Dazu soll die Datenbasis für MgO-Spritzbetonbauwerke im Steinsalz vervollständigt werden.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgt gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) als Verbundpartner und mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) als Partner auf Basis einer Zusammenarbeitserklärung.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Selektiver Rückbau des Funktionsbauwerkes GV2.
- AP2: Untersuchungen zur möglichen Variation der Spritzbetonrezeptur im Hinblick auf die technologische Verarbeitbarkeit.
- AP3: Laboruntersuchungen zur Vervollständigung der Datenbasis für MgO-Spritzbeton.
- AP4: Synthese/Wissenschaftliches Programm für ein In-situ-Verschlussbauwerk aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Ultraschallmessungen der BAM mit dem LAUS-Gerät wurden erfolgreich abgeschlossen. Klare, sequentielle Reflektionen an den Rändern der zahlreichen Spritzbetonschichten sind aus den Ergebnissen der Ultraschallmessungen nicht erkennbar. Signifikante Ablösungen zwischen die einzelnen Spritzbetonschichten sind nicht aus den Messergebnissen herauslesbar.
- An einigen Stellen traten jedoch Reflektoren in den Messungen auf. Ob diese Reflektoren tatsächliche Schwächezonen im Spritzbeton darstellen, wurde durch eine radiale Bohrung (Kerndurchmesser 150 mm) untersucht. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen.
- AP2: Das jetzt verwendete MgO ist in seiner Reaktivität gleichmäßig (Zitronensäuretestwert  $ZTW = (200 \pm 10) \text{ s}$ ).
- Im zweiten In-situ-Spritzversuch (nach der GV2-Rezeptur) wurden alle im ersten Versuch erkannten Unregelmäßigkeiten beim Mischen und Fördern der Trockenmischung korrigiert. Dadurch war die an Bohrkernen untersuchte Spritzbetonqualität gleichmäßiger.
- Im halbtechnischen Spritzversuch SBV5 wurde eine Vorzugsrezepturvariante eines MgO-Spritzbetons mit Salzzuschlag 0-8 mm zu erprobt. Aufgrund der Ergebnisse des SBV5 wurde beschlossen, diese Rezeptur für den dritten In-situ-Großversuch zu verwenden. Der Spritzkörper dieses Versuchs (GSBV3) hatte eine Abmessung von 3 m Höhe, 1,5 m Breite und eine Tiefe von 0,92 m (4 Spritzschichten mit mittleren Mächtigkeiten zwischen 16 cm und 29 cm). Einerseits ist es gelungen, mit dieser Rezeptur hohe Spritzmächtigkeiten zu erreichen. Allerdings traten dabei aber hohe Temperaturen bis max. 98,5 °C auf.
- AP3: Die Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit des im In-situ-Versuch GSBV3 gespritzten MgO-Spritzbetons am Steinsalz, zur Druckfestigkeit und zur Spaltzugfestigkeit bei unterschiedlichem Probenalter und zur Gas- und Lösungspemeabilität sind durchgeführt worden. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen.
- AP4: Noch keine Arbeiten.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: In-situ-Permeabilität in radial gestoßenen Bohrungen im GV2
- AP2: Vorbereitung und Durchführung des 4. In-situ-Spritzversuches in der Grube Teutschenthal. Zur Vorbereitung wird noch ein halbtechnischer Versuch in Freiberg (SBV6) durchgeführt.
- AP3: Nachuntersuchung der Bohrkern aus dem 4. In-situ-Spritzversuch (Haftzugfestigkeit, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Permeabilität).
- AP4: Bisheriges Resümee aus den 3 In-situ-Spritzversuchen und den begleitenden halbtechnischen Spritzversuchen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

J. Biegler, M. Gruner: Grube Teutschenthal: 20 Jahre In-situ-Forschungsarbeiten. Bergbau, 11 (2020), S. 498 - 503

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11769B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 31.10.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 168.309,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Kulenkampff	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der MgO-Beton D4 ist in zukünftigen HAW-Endlagern als Widerlagermaterial mit Abdichtfunktion für Schachtverschlüsse (in Ort beton) und für Streckenverschlüsse (in Spritzbeton) sowohl im Steinsalz als auch im Anhydrit potentiell einsetzbar. Das Vorhaben MgO-S3 schafft wissenschaftliche und technische Voraussetzungen für die Konzeption und den Bau von Streckenverschlussbauwerken aus MgO-Spritzbeton, die für eine genehmigungsfähige Errichtung zukünftiger Streckenverschlussbauwerke aus MgO-Spritzbeton in zukünftigen HAW-Endlagern im Steinsalz genutzt werden können. Dazu soll die Datenbasis für MgO-Spritzbetonbauwerke im Steinsalz vervollständigt werden.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgt gemeinsam mit der TU Bergakademie Freiberg (TU-BAF) als Koordinator und mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) als Partner auf Basis einer Zusammenarbeitserklärung.

Das Teilprojekt des HZDR soll Fragen klären, die mit der Parametrisierung der Durchlässigkeit des prinzipiell inhomogenen Materials verbunden sind.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Selektiver Rückbau des Funktionsbauwerkes GV2.

AP2: Untersuchungen zur möglichen Variation der Spritzbetonrezeptur im Hinblick auf die technologische Verarbeitbarkeit.

AP3: Laboruntersuchungen zur Vervollständigung der Datenbasis für MgO-Spritzbeton.

AP4: Synthese/Wissenschaftliches Programm für ein In-situ-Verschlussbauwerk aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz.

Im Teilprojekt des HZDR werden im Rahmen der AP1 und 3 Transportuntersuchungen im Labor in Langzeit-Injektionsexperimenten mit Erfassung durch Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und strukturelle Untersuchungen mit  $\mu$ CT vorgenommen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1/3: Auswertung von Poren- und Kornverteilungen aus  $\mu$ CT-Untersuchungen an Proben aus der GV2 nach Präparation bei IfG zur Charakterisierung der Betonierabschnittsgrenzen. Langzeit PET-Injektionsexperiment mit [ $^{22}\text{Na}$ ]NaCl-Lösung zeigt Eindringen im Bereich der BAG.

AP2: Keine eigenen Arbeiten im Teilprojekt.

AP3: Noch keine Arbeiten

AP4: Noch keine Arbeiten

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1/3: Fortsetzung PET-Injektionsexperimente an weiteren GV2-Proben, gemäß Absprache mit Partnern unter Einbeziehung des initialen Lösungskontakts. Untersuchung weiterer neu gewonnener Kerne.

AP2: Keine eigenen Arbeiten im Teilprojekt.

AP3: Untersuchungen zur Frühfestigkeit des MgO-Spritzbetons.

AP4: Noch keine Arbeiten.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11779</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz, Qualitätssicherung mit Ultraschall (MgO-S3)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 31.10.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 31.864,46 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Niederleithinger	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Dieses Vorhaben wird in Nachfolge des Vorhabens „MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl<sub>2</sub>-Lösung (MgO-SEAL)“ (Förderkennzeichen: 02E11435, 01.10.2015 - 30.04.2019) und im Verbund mit „Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A“ (Förderkennzeichen: 02E11769A) durchgeführt.

Das Verbundvorhaben soll belegen, dass beim Angriff von MgCl<sub>2</sub>-haltiger gesättigter NaCl-Lösung auf dem MgO-Spritzbeton, die Phasenumwandlung der 5-1-8-Phase in die thermodynamisch stabile 3-1-8-Phase zu einer Reduzierung der Permeabilität führt. Dazu sollen Proben aus dem MgO-Spritzbeton untersucht werden, die ausreichend lange unter Einwirkung der Lösung standen. Diese Proben sollen sowohl aus den Langzeitbohrlochversuchen im MgO-Spritzbetonbauwerk GV2 als auch durch dessen partiellen Rückbau gewonnen werden.

Das hier beschriebene Vorhaben umfasst im Wesentlichen Ultraschalluntersuchungen am Bauwerk und an Proben, deren Auswertung sowie Empfehlungen für das weitere Vorgehen und zukünftige Qualitätssicherung.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die BAM hat Anteile in folgenden Arbeitspaketen des Verbundprojekts

- AP1: Selektiver Rückbau des Funktionsbauwerkes GV2
- AP1.1: Aufnahme des Ist-Zustandes des MgO-Spritzbetons
- AP3: Laboruntersuchungen zur Vervollständigung der Datenbasis für MgO-Spritzbeton
- AP3.7: Materialcharakterisierung durch US-Anwendungen
- AP4: Synthese/Wissenschaftliches Programm für ein In-situ-Verschlussbauwerk aus MgO-Spritzbeton im Steinsalz
- AP4.3: Vorschlag für die begleitende Qualitätssicherung bzw. -dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Der MgO-Spritzbeton wurde durch Ultraschall-Messungen mit folgenden Zielen charakterisiert:

- Bestimmung von Ultraschall-Materialparametern
- Identifikation von Fehlstellen
- Ableitung von möglichen Parametern für eine Qualitätsüberwachung

Im vorigen Berichtszeitraum (1. Hj. 2020) waren zur Verifizierung früherer Untersuchungen und zur Identifikation von einzelnen Homogenbereichen, die nachfolgend untersucht werden sollen, wurden systematisch zerstörungsfreie Ultraschalluntersuchungen mit dem BAM-Gerät LAUS vom seitlichen Aufschluss des Bauwerks GV2 her durchgeführt worden (Juni 2020). Diese Messungen wurden im Sommer 2020 ausgewertet und die Ergebnisse mit den Projektpartnern diskutiert. In den Messungen zeigten sich einige Reflektoren (Anzeichen für Ablösungen, Risse oder Delaminationen). Diese konnten bisher aber noch nicht vollständig durch Bohrungen verifiziert werden, so dass hier noch weitere Auswertungen und Abgleiche mit den Projektpartnern erfolgen müssen

Weitere Ultraschall-Messungen waren im Juni 2020 auf eine ungefähr 0,5 m x 1 m Messfläche des ersten Spritzbetonversuch-Baukörpers durchgeführt. Das Ziel dieser Messungen war es, die Machbarkeit und Genauigkeit von Ultraschall-Messverfahren mit dem MIRA-System für die Zweck Qualitätssicherung von Spritzbetonbauwerken zu testen bzw. verifizieren. Auch diese Messungen wurden im Sommer 2020 ausgewertet. Die Ergebnisse wurden den Projektpartnern im August 2020 in einem später aktualisierten Ergebnisbericht übermittelt.

Am 26.11.2020 wurde ein weiterer Messeinsatz in der Grube Teutschenthal durchgeführt. Das Messfeld TT-MgO-S<sup>3</sup>-3 (Spritzbeton) wurde mit dem MIRA-System analog zur Messung vom Juni untersucht. Eine erste Auswertung erfolgte im Dezember 2020 und wurde den Projektpartnern im Januar 2021 vorgestellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Der Abgleich zwischen den Ergebnissen der LAUS-Messungen am GV2 mit den Bohrerergebnissen soll im ersten Halbjahr 2021 zum Abschluss gebracht werden. Die Ergebnisberichte sind dann diesbezüglich zu aktualisieren.

Die bisherigen Ergebnisse der Messungen an den neuen Spritzbeton-Versuchsfeldern sind noch gemeinsam mit den Projektpartnern zu bewerten. Zudem erfolgt im 1. Quartal 2021 noch ein weiterer, letzter Messeinsatz in der Grube Teutschenthal an einem neuen Messfeld.

Im 2. und 3. Quartal werden die Ergebnisse abschließend bewertet und mit Bohrerergebnissen final abgeglichen. Vorschläge für die Qualitätssicherung bzw. –dokumentation durch Ultraschalluntersuchungen werden auf Basis dieser Informationen vorbereitet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11789</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Wegemanagement bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland (WERA)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2019 bis 31.05.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 312.050,42 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Chaudry	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Projekt verfolgt das Ziel, Handlungsoptionen und Handlungsbedarfe in Bezug auf die Entsorgungswege für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle aufzuzeigen. Es will damit eine Basis schaffen, die Integration der verschiedenen Entsorgungsschritte (Zwischenlagerung, Konditionierung, Transporte bis hin zur Endlagerung) aktiv zu gestalten. Außerdem sollen Aufgaben und Ziele für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen sichtbar gemacht und eine Grundlage für wirtschaftliche Betrachtungen im Zuge zukünftiger Konkretisierungen der Entsorgungswege geschaffen werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

WERA ist in vier Arbeitspakete gegliedert:

AP1 widmet sich der systematischen Zusammenstellung von relevanten Bausteinen der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle. Analog zu den bei der Langzeitsicherheitsanalyse eingeführten FEP-Katalogen entsteht auf diese Weise ein Baukasten, der zur Ableitung von Entsorgungsszenarien dient.

In AP2 werden aus den Bausteinen Entsorgungsszenarien von der Zwischenlagerung bis zur Endlagerung beschrieben. Dabei wird zunächst eine größere Anzahl an grundsätzlich plausiblen Szenarien entworfen.

In AP3 werden aus der so entstehenden größeren Anzahl an Szenarien drei repräsentative Szenarien für eine detailliertere Analyse ausgewählt. Für diese Szenarien werden die zu erwartenden Abläufe und Schnittstellen beschrieben und relevante Einflussgrößen identifiziert.

In AP4 werden die Erkenntnisse in einem Stakeholder-Workshop diskutiert, der mit einem Arbeitspapier vorbereitet wird. Die Ergebnisse fließen dann in den Abschlussbericht ein, in dem auch Vorschläge für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsaufgaben adressiert werden.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP1: Das Arbeitspaket 1 ist abgeschlossen. Im Berichtszeitraum wurden in AP1 nur geringe Ergänzungen und Korrekturen vorgenommen, die sich aus der Bearbeitung von AP2 und 3 ergaben.

AP2: In AP2 wurden im Berichtszeitraum eine Reihe von Szenarien skizziert und ausgiebig diskutiert. Ein Referenzszenarium wurde festgehalten. Abweichende Szenarien wurden gegliedert nach den Entsorgungsschritten sowie den Ursachen, die jeweils zu Abweichungen vom Referenzszenarium führen. Wesentliche Aspekte wie Voraussetzungen, Kosten und Konsequenzen für andere Entsorgungsschritte wurden in Tabellenform festgehalten. Das Arbeitspaket 2 ist damit weitgehend abgeschlossen.

AP3: Eine Struktur für AP3 wurde entwickelt und wird laufend fortgeschrieben.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Berichtszeitraum 1/2021 sind folgende Arbeiten geplant:

- Letzte Ergänzungen an AP2
- Übergabe plausibler Szenarien an AP3
- Detaillierte Beschreibung ausgewählter Szenarien im Rahmen von AP3
- Organisation des Stakeholder-Workshops (AP4) als Online-Veranstaltung
- Inhaltliche Planung des Stakeholder-Workshops
- Fertigstellung des Berichtsentwurfs
- Durchführung des Online-Stakeholderworkshops
- Abschluss der Arbeiten von WERA
- Fertigstellung des Abschlussberichts

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11799A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.5		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 2.709.003,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Emmerich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Sandwich-Hauptprojekt wird im Felslabor Mont Terri (CH) ein großmaßstäbliches In-situ-Experiment zu einem vertikalen hydraulischen Verschlussystem nach dem Sandwich-Prinzip umgesetzt. Die umfangreiche Vorplanung dazu wurde im Sandwich-Vorprojekt (02 E 11587A, 02 E 11587B) durchgeführt. Ebenso wie das Vorprojekt ist Sandwich-HP ein Verbundprojekt von GRS und KIT mit Beteiligung der internationalen Partner BGR, Swisstopo, Enresa, NWMO, RWM und ENSI. Die Projektleitung liegt bei der GRS.

Das von KIT entwickelte Sandwich-System besteht aus Wechsellagen von Bentonit-Dichtsegmenten (DS) und hydraulisch leitenden Potentialausgleichsschichten (Äquipotenzialsegmente – ES). Im Sandwich-HP werden solche Dichtsystem in zwei vertikalen Experimentalschächten von 1.2 m Durchmesser und 12 m bzw. 10 m Tiefe eingebaut. Die Dichtsysteme werden über Druckkammern im Schachttiefsten mit synthetischem Opalinuston-Porenwasser aufgesättigt, das jeweils über geeignete Zuleitungsbohrlöcher zugeführt wird. Die Schächte und das umgebende Gebirge werden zur Überwachung des Gesamtsystems intensiv instrumentiert. Die Versuchsziele umfassen die Demonstration der Einbautechnik, die Untersuchung des Aufsättigungsprozesses, die Qualifizierung der Mess- und Überwachungstechnik, die Bewertung der Wirksamkeit des Sandwich-Verschlussystems.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Finalisierung Testplan
- AP2: Instrumentierung Opalinuston und Probennahme Opalinuston
- AP3: Erstellung Experimentalschächte und Charakterisierung EDZ
- AP4: Installation Sandwichverschluss und Instrumentierung einschließlich EDZ
- AP5: Betrieb, Monitoring, Datenvalidierung, Auswertung und Interpretation
- AP6: Laboruntersuchungen und Materialparametrisierung
- AP7: Assessment und Modellierung
- AP8: Dokumentation und Berichtswesen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2, 3: Siehe Projektstatusbericht der GRS zu 02 E 11799B.

AP4: 13 t Bentonit Calcigel wurde zu Kissen kompaktiert. Dafür wurde der Wassergehalt auf 17.6 % (110 °C) erhöht. Nach der schonenden Rücktrocknung auf einen Wassergehalt von 10.2 % (110 °C) wiesen die Kissen eine Trockenrohichte von 1,91 g/cm<sup>3</sup> auf. Ein Teil der Kissen plus Kissenbruchstücke < 10 mm wurden zu granularem Material < 1.4 mm gebrochen. Die Kornverteilung entspricht in etwa einer Fullerkurve mit dem Exponent 0.8. Für den Transport und die Lagerung vor dem Einbau in Schacht 1 wurde das DS Material vor Wasseraufnahme geschützt.

Die Installation des Sandwichverschlusses startete Ende September mit dem Einbau einer Ausgleichsschicht am Schachtboden. Die Druckkammer wurde mit der Schrägbohrung für die Fluidzufuhr verbunden. Die Installation des ersten ES startete bei einer Tiefe von 11,50 m unter dem Nischenboden. Vor der Installation der DS und ES wurden die ERT sowie die radialen Stressmesszellen an der Schachtwand angebracht. Die Installation des Sandwichverschlusses mit 64 Sensoren wurde vor Weihnachten abgeschlossen. Bis zum Einbau des Widerlagers wird das obere ES gegen Feuchteaufnahme geschützt und beschwert. Die installierten vertikalen TDR TAUPE Sensoren zeigen einen stabilen Zustand des Sandwichverschlusses.

AP5: Die Sensorliste wurde aktualisiert. Die Instrumentierung des Schacht 1 wurde bereits zum großen Teil in eine webbasierte Visualisierung eingebunden.

AP6: Mineralogisch/chemische Analysen (KAK, austauschbare Kationen sowie Ionentransport) der Ausbauproben des HTV-6/HTV-7 wurden fortgesetzt bzw. begonnen. Ausbau HTV-7 siehe Projektstatusbericht TUBAF zu 02 E 11799C

Es wurde mit der Planung des HTV-8 begonnen. Dafür wurde Bentonit Secursol UHP mit einem plastischen, nichtquellfähigen Ton gemischt, um den Quelldruck an die gewünschte Zielgröße anzupassen. Quelldruckversuche mit den Mischungen mit Pearson Wasser A3 wurden gestartet.

Die MiniSandwichversuche Oe9/Oe10 mit Secursol UHP, dessen EMDD durch Beimischung von Sand reduziert wurde, wurden nachdem das austretende Fluid nahezu die Zusammensetzung des einströmenden Pearson Wassers erreicht hat, nach 685 d ausgebaut. Die Daten finden Eingang in die Modellierung (AP7) und werden publiziert. MiniSandwichversuche Oe11/Oe12 wurden gestartet (Calcigel d = 1,63 g/cm<sup>3</sup> / Pearson Wasser A3). Nach einer anfänglichen Hydratation wurde eine freie Quellung von bis zu 5 % (max. Volumenzunahme für DS in Schacht 1 angenommen w) zugelassen, um die Quelldruckentwicklung zu untersuchen.

AP7: Siehe Projektstatusbericht des GRS zu 02 E 11799B.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP4: Installation des Plugs und des Bewässerungssystems (2/21)

AP5: Betrieb (ab 3/2021)

AP6: Charakterisierung der Ausbauproben HTV-6 & HTV-7 sowie der MiniSandwich Oe 9/10; Fortsetzung MiniSandwich Oe11/12 und weitere; Durchführung HTV-8 (ab 3/21); Quelldruckmessungen für abgemischten Secursol UHP; mineralogische Charakterisierung Opalinuston

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11799B</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt B			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.5			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2023		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.453.730,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Wieczorek	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Sandwich-Hauptprojekt wird im Felslabor Mont Terri (CH) ein großmaßstäbliches In-situ-Experiment zu einem vertikalen hydraulischen Verschlussystem nach dem Sandwich-Prinzip umgesetzt. Die umfangreiche Vorplanung dazu wurde im Sandwich-Vorprojekt (02 E 11587A und 02 E 11587B) durchgeführt. Ebenso wie das Vorprojekt ist Sandwich-HP ein Verbundprojekt von GRS und KIT mit Beteiligung der internationalen Partner BGR, Swisstopo, Enresa, NWMO, RWM und ENSI. Die Projektleitung liegt bei der GRS.

Das von KIT entwickelte Sandwich-System besteht aus Wechsellagen von Bentonit-Dichtsegmenten (DS) und hydraulisch leitenden Potentialausgleichsschichten (Äquipotenzialsegmente – ES). Im Sandwich-HP werden solche Dichtsystem in zwei vertikalen Experimentalschächten von 1.2 m Durchmesser und 12 m bzw. 10 m Tiefe eingebaut. Die Dichtsysteme werden über Druckkammern im Schachttiefsten mit synthetischem Opalinuston-Porenwasser aufgesättigt, das jeweils über geeignete Zuleitungsbohrlöcher zugeführt wird. Die Schächte und das umgebende Gebirge werden zur Überwachung des Gesamtsystems intensiv instrumentiert. Die Versuchsziele umfassen die Demonstration der Einbautechnik, die Untersuchung des Aufsättigungsprozesses, die Qualifizierung der Mess- und Überwachungstechnik, die Bewertung der Wirksamkeit des Sandwich-Verschlussystems.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Finalisierung Testplan
- AP2: Instrumentierung Opalinuston und Probennahme Opalinuston
- AP3: Erstellung Experimentalschächte und Charakterisierung EDZ
- AP4: Installation Sandwichverschluss und Instrumentierung einschließlich EDZ
- AP5: Betrieb, Monitoring, Datenvalidierung, Auswertung und Interpretation
- AP6: Laboruntersuchungen und Materialparametrisierung
- AP7: Assessment und Modellierung
- AP8: Dokumentation und Berichtswesen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Beendet.
- AP2: Die Instrumentierung des Tonsteins durch BGR und GRS mit Schwerpunkt auf der Umgebung von Schacht 1 wurde bereits im ersten Halbjahr 2020 abgeschlossen. Bis zur Schachtabteufung (AP3) wurden Porenwasserdrücke von 0.4 – 0.6 MPa gemessen, der Druck ist damit niedriger als erwartet. Bei der Schachtabteufung reagierten die Piezometer erwartungsgemäß mit einem allmählichen Druckabfall bis nahe Umgebungsdruck. Drei der Piezometer wurden von der Schachtbohrkrone durchtrennt, was auf eine Abweichung der kleinkalibrigen Minipiezometerbohrungen von der Sollrichtung zurückzuführen ist.
- AP3: Die Schachtabteufung begann im August 2020 mit gut viermonatiger Verzögerung und wurde Anfang November 2020 abgeschlossen, ohne dass größere Schwierigkeiten auftraten. Die Schächte haben einen Durchmesser von 1.18 m und Tiefen von 12.59 m (Schacht 1) bzw. 10.20 m (Schacht 2). Die beiden Injektionsbohrlöcher zur Befüllung der Druckkammern waren bereits vorab erstellt und verrohrt worden und wurden im jeweils erwarteten Bereich getroffen.
- AP4: Die Installationsarbeiten in Schacht 1 wurden bis auf das Stahlwiderlager und das Hydratationssystem abgeschlossen. Siehe Projektstatusbericht des KIT zu 02 E 11799A.
- AP5: Die Sensorliste wurde aktualisiert. Die bereits erfassten Daten der Sensoren im Gebirge können über ein webbasiertes Werkzeug auf verschiedene Arten visualisiert werden. Die zukünftige Instrumentierung wird, sobald verfügbar, eingebunden.
- AP6: Siehe Projektstatusbericht des KIT zu 02 E 11799A.
- AP7: Das mit Hilfe des Minisandwich-Experiments des IfG kalibrierte Double-Structure-Modell zur Beschreibung des Bentonits wurde zu einer ersten radialsymmetrischen Simulation der Aufsättigung des Dichtsystems in Schacht 1 eingesetzt. Die Ergebnisse sind in sich plausibel, allerdings sind weitere Kalibrierungen zur Absicherung nötig.
- AP8: Zur auf März 2022 verschobenen DAEF-Konferenz „3rd Conference on Key Topics in Deep Geological Disposal“ wurde ein Abstract eingereicht. Für Anfang 2021 sind der erste Datenbericht und der „As-built Report“ für Schacht 1 geplant.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Installation des Widerlagers und des Hydratationssystems (01-02, 2021)
- AP5: Aufsättigung des Verschlusssystems in Schacht 1 (ab März, 2020)
- AP7: Fortsetzung der hydraulisch-mechanischen Simulationsrechnungen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11799C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.5		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2020 bis 31.08.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.09.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 199.115,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Gruner	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Sandwich-Hauptprojekt wird im Felslabor Mont Terri (CH) ein großmaßstäbliches In-situ-Experiment zu einem vertikalen hydraulischen Verschlussystem nach dem Sandwich-Prinzip umgesetzt. Die umfangreiche Vorplanung dazu wurde im Sandwich-Vorprojekt (02 E 11587A und 02 E 11587B) durchgeführt. Ebenso wie das Vorprojekt ist Sandwich-HP ein Verbundprojekt von GRS, KIT und TUBAF mit Beteiligung der internationalen Partner BGR, Swisstopo, Enresa, NWMO, RWM, ENSI. Die Projektleitung liegt bei der GRS.

Das von KIT entwickelte Sandwich-System besteht aus Wechsellagen von Bentonit-Dichtsegmenten (DS) und hydraulisch leitenden Potentialausgleichsschichten (Äquipotenzialsegmente – ES). Im Sandwich-HP werden solche Dichtsysteme in zwei vertikalen Experimentalschächten von 1,18 m Durchmesser und knapp 12 m bzw. 10 m Tiefe eingebaut. Die Dichtsysteme werden über Druckkammern im Schachttiefsten mit synthetischem Opalinuston-Porenwasser aufgesättigt, das jeweils über geneigte Zuleitungsbohrlöcher zugeführt wird. Die Schächte und das umgebende Gebirge werden zur Überwachung des Gesamtsystems intensiv instrumentiert. Die Versuchsziele umfassen die Demonstration der Einbautechnik, die Untersuchung des Aufsättigungsprozesses, die Qualifizierung der Mess- und Überwachungstechnik sowie die Bewertung der Wirksamkeit des Sandwich-Verschlussystems.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Finalisierung Testplan
- AP2: Instrumentierung Opalinuston und Probennahme Opalinuston
- AP3: Erstellung Experimentalschächte und Charakterisierung EDZ
- AP4: Installation Sandwichverschluss und Instrumentierung einschließlich EDZ
- AP5: Betrieb, Monitoring, Datenvalidierung, Auswertung und Interpretation
- AP6: Laboruntersuchungen und Materialparametrisierung
- AP7: Assessment und Modellierung
- AP8: Dokumentation und Berichtswesen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Teilvorhaben der TU Bergakademie Freiberg bezieht sich auf die Arbeitspakete AP4, AP6 und AP8 des Verbundvorhabens.

- AP4: Für die erforderliche Einbautrockendichte des Bentonitgemisches ( $1,57 \text{ g/cm}^3$ ) ist in erster Linie die Trockendichte der Briketts entscheidend, die  $> 1,9 \text{ g/cm}^3$  sein sollte. Die Qualität der Granulatfraktion kann durch die Schüttdichte (trocken) geprüft werden. Ein Richtwert ist  $1,1 \text{ g/cm}^3$ .
- AP6: Der halbtechnische Versuch HTV-7 wurde am 28.4.2020 beendet, indem der Versuchsaufbau von der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung (Pearson-Water) getrennt wurde. Nach einer Entlastung des Flüssigkeitsdruckes in der Druckkammer wurde am 5.5.2020 die Druckzelle geöffnet und danach der eigentliche Rückbau begonnen. Im Ergebnis des Rückbaus wurden die Dichte- und die Feuchtverteilung im gesamten Bauwerk bestimmt. In Korrekturrechnungen wurden die unvermeidbaren Volumenänderungen der Schichten nach Abbau des Behälterdeckels berücksichtigt. Weiterhin wurden Proben für Nachuntersuchungen an KIT-CMM übergeben.
- AP8: Bericht zum Rückbau des halbtechnischen Versuches HTV-7 liegt vor (deutsche und englische Fassung).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Mitarbeit an der Auswertung des Einbaus des In-situ-Versuches 1 in Mont Terri, Fragen der Qualitätskontrolle der Bentonitmaterialien (Briketts und Granulat)
- AP6: Vorbereitung und Durchführung des halbtechnischen Versuches HTV-8 (DS ausgeführt mit abgemischtem Secursol UHP)
- AP8: Bericht zum Einbau des halbtechnischen Versuches HTV-8

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11809A</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Weiterentwicklung von d <sup>3</sup> f <sup>++</sup> : Hydrogeologische Modellierung im regionalen Maßstab (HYMNE), Teilprojekt A			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2022		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 722.640,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Schneider	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Mit d<sup>3</sup>f<sup>++</sup> steht ein Werkzeug zur Modellierung der thermohalinen Grundwasserströmung und des Radionuklidtransportes durch poröse und geklüftete Medien zur Verfügung, das seit 1995 im Rahmen der BMWi-geförderten Vorhaben GRUPRO, TRAPRO, E-DuR, A-DuR, H-DuR und GRUSS entwickelt wurde. Derzeit wird es im Rahmen der Projekte SUSE, SMILE, ANSICHT-II und go-CAM auf endlagerrelevante und weitere Fragestellungen angewendet. Ziel von HYMNE sind die Erweiterung und Verbesserung der Anwendbarkeit von d<sup>3</sup>f<sup>++</sup> auf Modelle mit freier Grundwasseroberfläche im Sedimentgestein und im Kristallin und eine Erhöhung der Prognosesicherheit. Teilziele sind die Erweiterung auf die Simulation der Grundwasserbewegung unter Permafrostbedingungen, eine Automatisierung der Modellkalibrierung, numerische Verbesserungen sowie Test und Anwendung des Codes. Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation mit der Universität Frankfurt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Bei der Durchführung des Verbundvorhabens werden folgende Arbeitspakete von der GRS bearbeitet:

- AP1: Erweiterung der Anwendbarkeit
- AP1.1: Kalibrierung (Anforderungen, begleitende Arbeiten)
- AP1.2: Kopplung mit Vorflutern (Konzept)
- AP1.4: Technische Verbesserungen (Konzepte)
- AP2: Grundwasserbewegung unter Permafrostbedingungen (Konzepte)
- AP4: Anwendungsrechnungen
- AP4.1: Äspö site descriptive model (SDM)
- AP4.2: Kraví Hora
- AP4.3: INTERFROST
- AP5: Wartung des Codes (Unterauftrag)
- AP6: Projektleitung und Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Die Entwicklung der 3D-Version des Kalibrierungswerkzeuges wurde fortgesetzt.
- AP1.4: In Zusammenarbeit mit den Entwicklern von ProMesh wurden verschiedene Vorgehensweisen getestet, um eine möglichst in weiten Teilen automatische Gittergenerierung für das Äspö-SDM (AP4.1) zu gewährleisten.
- AP2: Die Erhaltungsgleichungen für die Masse an Grundwasser (einschließlich Eis) und für die Wärme, die im INTERFROST-Projekt verwendet wurden, wurden noch einmal näher untersucht. Spezielles Augenmerk lag dabei auf der Vollständigkeit der Formulierungen sowie auf deren Gültigkeitsbereich.
- AP4.1: Das 3D-Modell muss basierend auf den Erkenntnissen vom letzten Topical Workshop neu aufgebaut werden und in der neuen Version sechs statt zwei Deformationszonen enthalten. Da nicht mehr alle Deformationszonen senkrecht verlaufen, kann der alte Ablauf zur Modellerzeugung nicht mehr verwendet werden, so dass unterstützende Arbeiten durch das G-CSC (s. AP1.4) erforderlich sind.
- AP4.2: Die Kravi Hora-Modelldaten wurden in 9/2020 von SURAO zur Verfügung gestellt. Die Konvertierung der hydrogeologischen Daten ist weitgehend abgeschlossen. Der Modellaufbau ist in Arbeit. Eine Schwierigkeit stellt die Unterteilung der Modellgeometrie in ein Regionalmodell und ein detaillierteres Modell im Bereich des (ehem.) geplanten Endlagers dar (s. AP5).
- AP5: Es wurden Weiterentwicklungen des Präprozessors (Gitteroptimierung) vorgenommen, Features zur Dateneingabe implementiert sowie Unterstützung bei numerischen Problemen (AP4.1) und dem Modellaufbau (AP4.2) geleistet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.1: Die Arbeiten werden fortgeführt.
- AP1.2: Die Recherche zu den Vorflutermodellen wird abgeschlossen und die Entscheidung „existierender Code oder Eigenentwicklung“ getroffen.
- AP2: Aufbereitung der Ergebnisse der Arbeiten zu den thermo-hydraulischen Gleichungen für die Grundwasserbewegung im Permafrost zu einem Bericht.
- AP4.1: Neuaufbau des 3D-Gitters, Umsetzung einer freien Oberfläche im regionalen 3D-Modell.
- AP4.2: Abschluss des Modellaufbaus und Beginn der Simulationen.
- AP4.3: Die Arbeiten können erst nach Implementierung der modifizierten Gleichungen (AP2) beginnen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Theodor-W.-Adorno-Platz 1, 60323 Frankfurt am Main		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11809B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Weiterentwicklung von d <sup>3f++</sup> : Hydrogeologische Modellierung im regionalen Maßstab (HYMNE), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 957.067,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Lemke	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Erweiterung und Verbesserung der Anwendbarkeit von d<sup>3f++</sup> auf Modelle mit freier Grundwasseroberfläche im regionalen Maßstab im Sedimentgestein und im Kristallin sowie einer Erhöhung der Prognosesicherheit.

Da dem Antrag nicht in vollem Umfang entsprochen werden konnte, werden in Abstimmung mit dem Verbundpartner GRS in einer ersten Projektphase die Arbeitspakete AP2, AP3.1 und AP3.2 bearbeitet.

Teilziel 1 (abgebildet in AP2) ist die Erweiterung des Anwendungsbereiches auf die Modellierung der Grundwasserströmung unter Permafrostbedingungen. Teilziel 2 (abgebildet in AP3.1 und AP3.2) ist die Weiterentwicklung der Lösungsverfahren im Hinblick auf eine einfachere Nutzbarkeit. Die Verfahren bieten sehr viele Möglichkeiten. Um diese erfolgreich einzusetzen sind oft noch Experten nötig. Zur breiteren Nutzbarkeit, insbesondere in der Anwendung auf große Regionalmodelle, sollen die Robustheit der Verfahren erhöht und viele der Schritte, die bisher noch manuell durchgeführt werden, etwa in der Gitterverfeinerung, automatisiert werden. Diesem Ziel dient auch die Neustrukturierung der Software.

Die Ergebnisse werden zusammen mit den Projektpartnern verwertet. Die große Nutzergemeinde des Simulationssystems UG ist eine ausgezeichnete Plattform zur Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse.

Es erfolgt eine Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig, und der Firma TechSim, Kieselbronn, als Unterauftragnehmerin der GRS.

Das Verbundprojekt ist ein Folgevorhaben der zwei BMWi-Projekte vom 01.03.2012 – 31.10.2015 (FKZ 02 E 11062) und vom 01.04.2016 – 31.07.2019 (FKZ 02 E 11476).

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Bei der Durchführung des Verbundvorhabens werden folgende Arbeitspakete vom G-CSC (Goethe-Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen) der Universität Frankfurt bearbeitet:

- AP1: Erweiterung der Anwendbarkeit (Kalibrierung, Kopplung mit Vorflutern, Zusammenspiel freie Oberfläche – Kluftgestein, technische Verbesserungen)
- AP2: Grundwasserbewegung unter Permafrostbedingungen
- AP3.1: Verbesserung der Robustheit der Löser durch hybride AMG-GMG Kombination
- AP3.2: Softwareintegration und Neustrukturierung
- AP3.3: Entwicklung und Implementierung eines voll-gekoppelten VOF-Verfahrens
- AP4: Anwendungsrechnungen (Äspö site descriptive model, Kraví Hora, INTERFROST)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Im Rahmen der Entwicklung des Modells der Grundwasserströmung mit der phreatischen Oberfläche wurde das auf der Richards-Gleichung basierte Strömungsmodell mit dem Transport der aufgelösten Stoffe sowie der variablen Dichte erweitert. Statt der expliziten Darstellung der freien Oberfläche, die das gesättigte Teilgebiet von dem ungesättigten trennt, führt die Richards-Gleichung die vom Druck abhängende Sättigung ein. In der Standardform enthält diese Gleichung keine Dichteabhängigkeit. Diese wurde aber von mehreren Autoren an Anwendungen mit geklüfteten porösen Medien angepasst. Die Erweite-

rung dieses Modells auf die variable Dichte erfordert weitere Annahmen und braucht eine spezielle Behandlung mancher Problemparameter, wie z. B. der Neuwasserbildung. Sie kann aber die Strömung im Falle der komplizierten Geometrie des gesättigten Teilgebiets gut beschreiben. Das auf der Richards-Gleichung basierte Modell kann des Weiteren mit der expliziten Darstellung des freien Randes für die Verifizierung verglichen werden.

- AP2: Die Arbeiten wurden entsprechend der im Antrag angegebenen Vorgehensweise fortgesetzt.
- AP3.1: Die Arbeiten zur Sicherstellung der Anwendbarkeit des SGMG-Verfahrens für die thermo-hydraulische Modellierung der Grundwasserströmung in  $d^3f^{++}$  wurden weiter fortgesetzt. Der Arbeitsschwerpunkt war weiterhin die Bereitstellung geeigneter Grobgitter der im Vorhaben HYMNE zu Grunde liegenden Gebietsrepräsentationen. Dabei lag ein Fokus auf den aus dem Projekt Nachhaltige Anpassungsstrategien für die Wasserwirtschaft (NAWAK) stammenden 3D-Schichtgeometrien, die aus Raster-GIS-Daten der Küstenregion um das Wasserwerk in Sandelermöns erzeugt worden sind. Um die dort auftretenden unnatürlichen numerischen Artefakte im Anfangszustand der freien Oberfläche des Grundwasserspiegels in der Nähe der Gebietsoberfläche zu vermeiden, wurden diese Geometrien jeweils um eine virtuelle Deckschicht erweitert, indem die ursprüngliche oberste Schicht mit gleicher Permeabilität vertikal extrudiert wurde. In diesem Zusammenhang entstandene Stabilitätsprobleme im Anstieg der Courant Zahl wurden durch Korrektur der Orientierung der Elementseitenflächen erfolgreich behoben und die Löserkonvergenz durch zusätzliche Optimierung der Elementqualitäten der Volumengitter insgesamt verbessert. Im Zuge dessen wurde überdies ein kritischer Fehler in der uG4 Kernbibliothek analysiert und behoben, der bei parallelen Rechnungen aufgrund einer inkonsistenten Gitterverteilung sporadisch zu Simulationsabbrüchen führte.
- AP3.2: Eine Besonderheit vieler hydrogeologischer Modellgebiete, wie z. B. Čihadlo, sind die, in der vertikalen Richtung, schmalen Schichten, die für die genaue Berechnung der Strömung vom Diskretisierungsgitter, insbesondere in ihrer Höhe, gut aufgelöst werden müssen. Bei der Vermischung solcher Gebiete entstehen Gitterelemente mit einem sehr schlechten Seitenverhältnis. Die Anwendung konventioneller FV-Diskretisierungen führt dann zu extrem schlecht konditionierten Steifigkeitsmatrizen und dementsprechend zur langsamen Konvergenz der iterativen Lösungsverfahren. Für diese Fälle wurde im Rahmen dieses Projekts ein weiteres FV-Schema mit einem reduzierten Muster für die Steifigkeitsmatrizen implementiert und getestet. Für manche Gebiete mit den schmalen Schichten wurde mit diesem Verfahren eine deutliche Verbesserung des Konvergenzverhaltens der linearen Löser erreicht. Die Diskretisierung der Randbedingungen an der freien Oberfläche beruht im Falle des Level-Set-Verfahrens auf der Extrapolation der Lösung. Für die Entwicklung optimaler Vorgehensweisen für diese Diskretisierung und die Minimierung der numerischen Artefakte wurden in dieser Phase des Projekts weitere Extrapolationstechniken und Arten der Randbedingungen getestet. Dabei wurden die entsprechenden Programm-interfaces für die einfachere Integration von weiteren Implementierungen umstrukturiert. Die Auswertung der Tiefe der phreatischen Oberfläche an der Gebietsoberkante wurde überarbeitet und verbessert. Diese Korrekturen lösen das Problem mit der falschen Visualisierung der Tiefe in der Nähe der vertikalen Ränder.
- AP3.3: Es wurden Vorarbeiten durchgeführt.
- AP4: Im Äspö Site Descriptive Model (SDM) wurde damit begonnen Deformationszonen innerhalb des Kristallingesteins mit erhöhter Zerklüftung dreidimensional aufzulösen. Die initiierte gemeinsame Entwicklung dafür vorgesehener Mesh-Skripte mit dem Kooperationspartner GRS zielt hierbei auf die automatisierte Rekonstruktion einzelner und die konforme Verschneidung mehrerer Deformationszonen sowie eine korrespondierende Volumengittergenerierung ab. Zur allgemeinen Optimierung des Workflows zur Gittergenerierung wurde die Meshing Software ProMesh zudem stetig weiterentwickelt, z. B. durch Erweiterung der Helferwerkzeuge um eine Elementselektion nach mehreren Attributen.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden entsprechend der im Antrag angegebenen Vorgehensweise fortgesetzt.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11819</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Mineralumwandlung und Sorption bei erhöhten Temperaturen in geklüfteten Kristallingesteinen und Barrierematerial (MUSE)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.335.968,50 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Flügge	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom Juli 2013 bzw. Mai 2017 regelt das Auswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland. Dabei kommen grundsätzlich die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht. Im Rahmen der Forschungsvorhaben CHRISTA, KONEKD, CHRISTA-II, SUSE und UMB wurden bzw. werden einerseits verschiedene Fragestellungen bezüglich des technischen Konzepts und des Sicherheits- und Nachweiskonzepts für ein Endlager im Kristallingestein bearbeitet, und andererseits Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren als Funktion von Lösungszusammensetzung, Temperatur und mikrobieller Aktivität untersucht.

Basierend auf den genannten Arbeiten und in ihrer Fortführung soll in dem hier skizzierten Projekt MUSE (i) die Übertragbarkeit der mit der im Projekt SUSE entwickelten neuen Methode gewonnenen Sorptionsdaten überprüft und die Anwendbarkeit auf andere Kristallinstandorte durch Erhebung einer Bandbreite von Sorptionsdaten im Kristallingestein getestet werden, (ii) eine Methode zur Untersuchung des Einflusses von erhöhten Temperaturen auf Mineralumwandlungen und Gasfreisetzung in Klüftfüllungen entwickelt werden und (iii) Mechanismen der Bentonitumwandlung und Gasfreisetzung untersucht werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Bei der Durchführung des Vorhabens werden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP1: Übertragbarkeit der normierten Verteilungskoeffizienten zwischen verschiedenen Kristallin-Standorten
- AP2: Einfluss von erhöhten Temperaturen auf die Stabilität von Klüftfüllungen
- AP3: Einfluss von erhöhten Temperaturen auf die Stabilität von Bentoniten
- AP4: Dokumentation und Projektleitung

## 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Versuchsplanung wurde basierend auf den im Vorhaben SUSE nahezu abgeschlossenen Arbeiten zur Methodenentwicklung überarbeitet. Eine wesentliche Änderung ist, dass nunmehr statt Sorptionsversuchen Desorptionsversuche durchgeführt werden. Weitere Anpassungen betreffen die Versuchsrandbedingungen (Temperatur, Einsatz

von pH-Puffern). Die Laborarbeiten in AP1 wurden im Dezember im Anschluss an die Beendigung der Sorptionsbatches und die Auswertung der ersten Ergebnisse im Vorhaben SUSE begonnen. Das synthetische Grundwasser für das URL Bukov (Tschechien) wurde in einem mehrstufigen Verfahren aus den in Tschechien vorgefertigten Pulvermischungen hergestellt. Das Rezept für das synthetische Grundwasser für den URL KURT (Südkorea) wurde in Abstimmung mit den südkoreanischen Kollegen erstellt und die Herstellung des synthetischen Grundwassers soll im Januar 2021 erfolgen. Die Zerkleinerung und die Gewinnung der Korngrößenfraktion 1-2 mm aus den tschechischen und südkoreanischen Kristallin-Kernproben wurde begonnen.

- AP2: Die persönliche Übergabe der 15 Kristallin-Kleinkerne aus einem Dolerit-Kern und einem Gneis-Kern von IGEM RAN an GRS konnte Corona-bedingt nicht realisiert werden. Tschechische und südkoreanische Proben liegen zwar an der GRS vor, allerdings sind die geplanten Charakterisierungen dieser Proben durch IGEM RAN Corona-bedingt leider immer noch nicht realisierbar. Die Arbeiten in diesem AP sollen nach der Rückkehr zum uneingeschränkten Dienstreiseverkehr zwischen Deutschland und Russland wieder aufgenommen werden.
- AP3: Die für die Versuche vom IGEM RAN an die GRS übergebenen vier Bentonite wurden bereinigt. Mit diesen Bentoniten wurden 35 Versuche bei 120 °C Mitte bis Ende Oktober gestartet. Zehn Versuche davon untersuchen den Einfluss der Bentonite auf die Korrosion des für das deutsche Endlagerprogramm relevanten Gusseisens GGG-40 und des für das russische Endlagerprogramm relevanten Stahls St-37 (ein auf dem deutschen Markt verfügbares Analogon). Fünf weitere Versuche untersuchen den Einfluss des erhöhten Fluiddrucks von 5 MPa. In 12 Versuchen werden bereinigte Bentonite untersucht.
- AP4: Kommunikation mit IGEM RAN (Russland), KAERI (Südkorea), SÚRAO (Tschechien) und Probenbeschaffung (Bentonit aus Tschechien). Da in Südkorea noch kein Referenzbentonit festgelegt wurde, sehen sich südkoreanische Kollegen nicht imstande, GRS einen südkoreanischen Bentonit für die Untersuchungen zuzusenden. GRS werden voraussichtlich keine Kern-Proben aus China zur Verfügung gestellt.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP1: Beginn der Sorptionsexperimente.
- AP2: Beginn der Versuche mit Kristallin-Proben vom Standort Yeniseysky.
- AP3: Abschluss der 1. Versuchsreihe mit vier für das russische Endlagerprogramm relevanten Bentoniten. Start der 2. Versuchsreihe mit dem tschechischen Bentonit und Wiederholung einiger Batches aus der 1. Versuchsreihe.
- AP4: Durchführung der Abstimmungen mit Partnern des IGEM RAN zur Diskussion der geplanten und laufenden Laborexperimente, inkl. Bereitstellung von Probenmaterial. Vorbereitung und Vergabe des Auftrags zu Mineralogie- und Kluftstruktur-untersuchungen von Kristallingesteinen aus Tschechien und Südkorea an IGEM RAN.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11829</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Tonsteinforschung im Felslabor Mont Terri ab Phase 25 (MonTe-25)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 546.040,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Czaikowski	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Als Partner im Betreiber-Konsortium führt die GRS seit 1999 im Auftrag des BMWi Forschungsarbeiten im schweizerischen Untertagelabor Mont Terri im Opalinuston durch. Die Fortführung der Arbeiten zur Tonforschung in Mont Terri in den kommenden Phasen dient (1) der Erarbeitung eines fundierten Verständnisses der für die Systementwicklung wichtigen thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Prozesse, (2) der Entwicklung qualifizierter Prozessmodelle durch Vergleich von Modellrechnungen mit Experimenten in situ und im Labor, (3) der Sammlung zuverlässiger Daten zum Materialverhalten zur Qualifikation der Prozessmodelle; dazu Entwicklung bzw. Verbesserung von Messmethoden und (4) dem Wissenserwerb durch die Zusammenarbeit mit internationalen Fachkollegen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: FE Experiment – Porendruckmessungen und Modellrechnungen als Beitrag zum Streckenlagerungsexperiment der NAGRA im 1:1 Maßstab
- AP2: HE-E Experiment – Weiterführung des im Rahmen des EU-Projekts PEBS aufgebauten Erhitzerversuchs im Mikrotunnel (mit NAGRA, ENRESA, BGR, Obayashi)
- AP3: DM-A Experiment – Langzeitverformungsmessung des Tonsteins in einem Bohrloch
- AP4: Keine Fortführung der Arbeiten zum SB-A Experiment
- AP5: Keine Fortführung der Arbeiten zum DB Experiment
- AP6: Auslagerung weiterführender Arbeiten zum LT-A Experiment in einer eigenen Vorhabenskizze
- AP7: Weiterentwicklung von VIRTUS für den Einsatz im Tonstein
- AP8: Mine-By Experiment (MB-A) in der sandigen Fazies (mit BGR und Swisstopo)
- AP9: CD-A Experiment in der sandigen Fazies (Konsortialführer BGR)
- AP10: Technical und Steering Meetings

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Simultan zu dem im internationalen Projekt DECOVALEX 2023 geplanten Vorgehen werden von der GRS die Modellierungsarbeiten mit steigender Komplexität durchgeführt. Zunächst erfolgt die Betrachtung eines Schnittes durch einen Erhitzer als 2-dimensionales Modell. Im ersten Schritt wurden nur thermische Prozesse und die Anisotropie in der Wärmeleitfähigkeit des Opalinustons betrachtet. Im Vergleich mit den Partnern aus DECOVALEX konnte die GRS gute Ergebnisse vorweisen. Im zweiten Schritt wurden hydraulische Prozesse eingefügt. Es zeigt sich, wie zu erwarten war ein Porendruckanstieg im Opalinuston aufgrund des Wärmeeintrags durch den Erhitzer. Im letzten Schritt dieses Modells sollen auch die mechanischen Aspekte integriert werden. Hier hat die GRS noch Schwierigkeiten, da das linear elastische Stoffgesetz in CODE\_BRIGHT zum Berichtszeitpunkt noch keine Anisotropie in den mechanischen Parametern wie dem E-Modul zulässt. Die GRS steht zu diesem Thema mit den Entwicklern von CODE\_BRIGHT in engem Kontakt und arbeitet an einer Lösung.
- AP2: Die Messungen wurden fortgeführt, die Messwerte zeigen die Tendenz der Vorjahre. Im März ist durch Bohrungsarbeiten in der Nische eine kurzfristige Trennung der Erhitzer von der Stromzufuhr notwendig gewesen. In den Messwerten zeigt sich dazu eine reversible Temperaturreduktion.
- AP3: Die Messungen wurden fortgeführt, die Messwerte zeigen eine deutliche Reaktion auf die Streckenerweiterung durch Zunahme der Porendrücke und Temperaturwerte.
- AP7: VIRTUS wurde um die Funktion zur Translation beim Einlesen von Laserscandaten von IFF erweitert und von der GRS beim Einlesen der Laserscandaten in CD-A angewendet.
- AP8: Für die Modellierung des Mine-By Experiments wurde ein 3-dimensionales Modell verwendet und die streckenweise Auffahrung wurde zeitgerecht simuliert. Im ersten Schritt wurde das in CODE\_BRIGHT neu verfügbare „smoothed excavation“ Tool verwendet. Die Ergebnisse zeigen eine Porendruckerhöhung hinter der Ortsbrust infolge der Auffahrung.
- AP9: Die Messungen wurden fortgeführt, die Messwerte zeigen folgende Tendenz: Die Sensoren im Bereich des Spritzbetonausbaus zeigen eine konstante Abnahme des Drucks durch den Einfluss der bewetterten Gallery. Mit sinkendem Abstand der Sensoren zur Nische nimmt auch der Druck ab. Im Bereich des Stahlringausbaus starten die Messungen mit einem stark abgesunkenen Druck. Der nischenfernste Sensor zeigt einen leichten Druckanstieg.
- Die Messdaten lassen somit eine klare Unterscheidung zwischen den Ausbauarten zu. Neben den Porendruckmessungen beteiligt sich die GRS an den Modellierungsarbeiten. Hierfür konnten mithilfe von VIRTUS die Laserscandaten so aufbereitet werden, dass ein Modell für die numerische Simulation erstellt werden konnte. Zudem wurde ein weniger komplexes Modell mit vereinfachter Geometrie erstellt. Zusammen mit den Kollegen der BGR soll das weitere Vorgehen besprochen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Weiterführung der Messungen in den laufenden Experimenten
- Durchführung begleitender Modellierungen zu den laufenden Experimenten

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11839</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Entwicklung eines Leitfadens zur Auslegung und zum Nachweis von geotechnischen Barrieren für ein HAW Endlager in Salzformationen (RANGERS)	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 31.12.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 412.889,06 EUR	<b>Projektleiter:</b> Simo

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Geotechnische Barrieren für ein Endlager in Salzformationen wurden schon im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte behandelt. Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde ein Nachweisverfahren für die Integrität von Verschlusselementen in einem HAW Endlager in steil-lagernden Salzformationen entwickelt. Im Projekt ELSA wurden Schachtverschlüsse für HAW-Endlager ausführlich behandelt. Erste Empfehlungen zur Planung und Ausführung von geotechnischen Barrieren wurden vom Arbeitskreis Salzmechanik der DGGT formuliert. Die BGE und BGE TECHNOLOGY entwickeln und bauen seit über zehn Jahren Strömungsbarrieren im Endlager Asse. Mittlerweile wurden 32 Strömungsbarrieren im Routinebetrieb gebaut. Ein Prototypabdichtbauwerk wurde von der BGE im realen Maßstab im Endlager Morsleben gebaut und wird gerade wissenschaftlich untersucht. Trotz umfangreichen Wissen und Erfahrung über geotechnischen Barrieren in Salzformationen, fehlt es an Regelwerke für eine qualitätsgesicherte Auslegung solcher Bauwerke für ein HAW-Endlager.

In Kollaboration mit SANDIA National Laboratories setzt sich BGE TECHNOLOGY im Vorhaben RANGERS zum Ziel, einen Leitfaden zu entwickeln, in dem das vorhandene Wissen und die gesammelte Erfahrung über geotechnische Barrieren im Salz in Deutschland und in den USA einfließen. Empfehlungen zur Auslegung und zum Nachweis von geotechnischen Barrieren basierend auf den Stand der Wissenschaft und Technik sind zu formulieren und ein Überblick über neuartige Konzepte, Baustoffe und Technologien, die den Stand der Technik von Morgen prägen werden, wird gegeben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP0: Organisation der Zusammenarbeit zwischen BGE TEC und SANDIA – Literaturrecherche zu geotechnischen Bauwerken im Salz
- AP1: Zusammenstellung des Standes der Wissenschaft und Technik bei der Planung und Bau von geotechnischen Barrieren für Endlager im Salz
- AP2: Herleitung und Zusammenstellung der Randbedingungen und Anforderungen
- AP3: Entwicklung des Leitfadens zur Auslegung und zum Nachweis von geotechnischen Barrieren für ein HAW-Endlager in Salzformationen
- AP4: Nutzung des Leitfadens für die Auslegung und den Nachweis von geotechnischen Barrieren für ein im FuE-Vorhaben KOSINA entwickelte generische Endlagerkonzepte
- AP5: Bewertung der Ergebnisse und Vergleich mit Erkenntnissen aus früheren Projekten
- AP6: Dokumentation und Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2: Arbeiten zur Auslegung eines Endlagers innerhalb eines generischen Salzkissens wurden im Berichtszeitraum abgeschlossen. Das Endlagerlayout ist durch zwei gleichgroße Einlagerungsbereiche oder Einlagerungsflügel und eine zentrale Doppelschachanlage gekennzeichnet. Das gewählte Layout unterscheidet sich von vergleichbaren Endlagerkonzepten im Salz, die stets einen Flügel beinhalten und ermöglicht die Anordnung der Schächte zentral im Salzkissen, im Bereich der größten Mächtigkeit der Salzfolgen. Damit stehen für einen späteren Verschluss auch die größtmögliche Dichtungslänge zur Verfügung.

Das erarbeitete Modell wurde Sandia vorgestellt. Die amerikanischen Projektpartner bewerteten das Endlagerkonzept als sehr detailliert und schätzten ein, selbst nicht ein Konzept in einem vergleichbaren Zeitraum bereitzustellen. Die geplanten numerischen Simulationen des AP4 sollen deshalb nur am deutschen Layout durchgeführt werden. Ein Vergleich ist damit hinfällig, allerdings ermöglicht dieses Vorgehen deutlich detailliertere Analysen am entwickelten Endlagerkonzept.

Arbeiten zu den FEPs für geotechnische Barrieren wurden weitergeführt und Zwischenergebnisse mit Sandia diskutiert. Für die Teilsysteme Schacht- und Streckenverschluss wurden jeweils alle relevanten FEPs identifiziert und Komponenten zugeordnet. Der gewählte methodische Ansatz stellt sicher, dass die zusammengestellten FEPs sowohl für Deutschland als auch für die USA Geltung finden.

AP3: Masterarbeit „Konzepte für die Auslegung und den Nachweis von geotechnischen Barrieren in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in Steinsalz“ wurde im Berichtszeitraum abgeschlossen. Die Ergebnisse flossen direkt in die Erarbeitung einer Methodik zur Auslegung und zum Nachweis geotechnischer Barrieren ein. Von der ursprünglichen Projektidee, die Methodik in einen Leitfaden zu überführen, wurde abgesehen. Die Methodik wird zunächst nur für das Vorhaben RANGERS angewendet. Die Methodik berücksichtigt alle Aspekte der Auslegung und der Integritätsbewertung von EBS sowie deren Rolle in einer integrierten Gesamtbewertung. Ausgehend vom regulatorischen Rahmen wird ein Sicherheitskonzept definiert. Dieses ist Grundlage für die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes und eines Verschlusskonzeptes für den jeweiligen Standort. Die Entwicklungen am oder im Endlagersystem können durch einen FEP-Katalog und eine Szenarienentwicklung analysiert werden. Basierend darauf können die relevanten Belastungen, die auf das EBS einwirken, für die Integritätsbewertung identifiziert und in eine Integritätsanalyse überführt werden. Die Bewertung der Einzelbarrieren fließt dann in die Bewertung des Gesamtsystems und eine radiologische Konsequenzenanalyse ein.

AP4: Es wurde ein Bearbeitungskonzept für die durchzuführenden numerischen Analysen erstellt: Sandia wird chemische Berechnungen, BGE TEC (thermo-) mechanische Berechnungen und beide werden hydraulische bzw. hydraulisch gekoppelte Berechnungen durchführen. Weiterhin wurden konkrete Rechenfälle für Lösungs- und Gaszutritte aus den erarbeiteten FEPs abgeleitet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1+AP3: Teilberichtsentswürfe zum Stand der Technik werden mit Sandia abgestimmt.

AP2: Die Abstimmung der FEPs mit SANDIA wird fortgesetzt.

AP4: Das Bearbeitungskonzept wird um einen detaillierten Zeitplan ergänzt und die ersten Berechnungen werden gestartet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11849A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 3.003.244,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Röhlig	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär geforscht werden: Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden. Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert (Transdisziplinaritätsforschung). Spezielle Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt.

Im TAP SAFE wird transdisziplinär untersucht, ob und inwieweit Sichtweisen von Nicht-Spezialisten nahelegen, das Konzept des Safety Case (SC) anzupassen oder weiterzuentwickeln, um so die Diskurs- und Beratungsfähigkeit zu verbessern. Das Institut für Endlagerforschung IELF koordiniert das TAP und bearbeitet mit weiteren Partnern die Module „Analyse“, „Synthese und Konzept“, „Transdisziplinäre Kommunikation und Auswertung“, „Ergebnisdarstellung von Modellrechnungen“ sowie „Berichterstattung und Empfehlungen“. Der Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik LfDG leistet Forschungsarbeiten in den Modulen „Transdisziplinäre Kommunikation und Auswertung“ und „Analyse des langzeitigen Systemverhaltens von Tiefenlagern“. Der Arbeitsschwerpunkt der risicare GmbH (im Unterauftrag) ist das Thema „Ungewissheiten“. In einem Verfahren, das die Rückholung eingelagerter Abfälle im Falle einer ungünstigen Entwicklung des Lagers vorsieht, muss man sich frühzeitig Gedanken machen über Monitoring-Strategien, Entscheidungswege, Entscheidungsträger und Verantwortlichkeiten. Dies ist Gegenstand des TAP TRUST, in dem der LfDG zu Fragen des Monitorings forscht.

Das IELF koordiniert gemeinsam mit dem ITAS das Verbundvorhaben sowie die Außenkommunikation.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Nachfolgend werden die Arbeitsinhalte für das gesamte Verbundvorhaben dargestellt. Zur Zuordnung der Arbeiten zu den Vorhabenpartnern wird auf die Vorhabenbeschreibung verwiesen.

Modul SAFE 1: Analyse: Desk research; Literaturstudie zu Ungewissheiten; Zusammenstellung zu Szenarien; Zusammenstellung von Botschaften und Informationen sowie deren Darstellungen (Indikatoren, Abbildungen) Modul SAFE 2: Synthese und Konzept: Synthese Modul 1: Gemeinsamkeiten, Schnittmengen; Konzepte und Wahrnehmung von Ungewissheiten; Methodisches Konzept für eine fokussierte empirische Untersuchung

Modul SAFE 3: Transdisziplinäre Kommunikation und Auswertung

Modul SAFE 4: Ergebnisdarstellung von Modellrechnungen, Indikatoren, Ungewissheiten

Modul SAFE 5: Analyse des langzeitigen Systemverhaltens von Tiefenlagern

Modul SAFE 7: Lösungsorientierte Berichterstattung und Empfehlungen

Modul TRUST 4: Analyse des Tiefen-/Endlagerverhaltens im Monitoringzeitraum anhand von numerischen TH2M-gekoppelten Simulationen: Literaturanalyse; Interaktiver Aufbau einer Gesprächsbasis mit der AGBe; Exemplarische Analyse des offenen/versetzten Tiefen-/Endlagerverhaltens im Monitoringzeitraum anhand von numerischen TH2M-gekoppelten Simulationen; Diskursiver Dialog mit der AGBe zur Identifizierung von Anforderungen an die Ausgestaltung von als vertrauenswürdig angesehenen Monitoringprogrammen; Rückspiegelung an außerwissenschaftliche Akteure/AGBe; Aufbau einer Plattform zur Visualisierung und Illustration von Simulationsergebnissen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeiten im Gesamtvorhaben sowie in den TAP wurden entsprechend der für Covid-19-Bedingungen entwickelten Szenarien fortgesetzt und die Vorgehensweisen laufend situationsgerecht angepasst.

Es wurden mehrere Personaleinstellungen vorgenommen (LfDG: ein wiss. Mitarbeiter (50 %), der je zur Hälfte in den TAP SAFE und TRUST arbeitet; IELF: ein wiss. Mitarbeiter (50 %), der im TAP SAFE arbeitet).

IELF (Koordination und Kommunikation): Im Berichtszeitraum wurden Kontaktmöglichkeiten und Schnittstellen wie virtuelle Teeküchen oder Koordinationssprechstunden eingerichtet und verbessert. Des Weiteren konnte eine Vertiefung der internen Vernetzung erreicht werden. Dies betrifft u. a. die fortschreitende Arbeit an den TAP-übergreifenden Themen oder auch das erste der eigeninitiativ organisierten „Bearbeitertreffen“. Das interne Kommunikationskonzept wurde fertiggestellt. Newsletter für das interne wie auch für ein externes Publikum wurden versendet und ein Flyer für das Gesamtprojekt entworfen. Auf der beständig weiterentwickelten und gepflegten Homepage gibt es nun ein auch an fachfremde Interessierte gerichtetes Glossar zu zentralen Begriffen des Projektes. Es wurden eine Kooperationsplattform zum gemeinsamen Arbeiten mit Dokumenten sowie Mailinglisten für unterschiedliche Themen und Adressaten eingerichtet. Abgeschlossen wurde außerdem die Erstellung eines Corporate Designs für TRANSENS für verschiedene Formate (Arbeitsberichte, Präsentationen etc.).

Diese Ergebnisse wurden auf dem TRANSENS-Arbeitstreffen präsentiert. Im November 2020 wurde dieses zusammen mit einem Teamleiter-Treffen in Zusammenarbeit mit dem KIT-ITAS organisiert und durchgeführt; aufgrund der Pandemiesituation als Onlineveranstaltung. Ein Vortrag zum Thema „Wissenschaft: Transdisziplinär und verantwortlich für die Ergebnisse?“ wurde im September auf der Tagung der Evangelischen Akademie Loccum gehalten (Standortsuche: Was tut sich auf der „weißen Landkarte“?). Die Zusammenarbeit im Koordinationsteam (TUC-IELF und KIT-ITAS) wurde weiterentwickelt, insb. in Hinblick auf die verteilten Arbeitsformen.

IELF (TAP SAFE): Im Rahmen des TAP-Treffens (Juli 2020) wurden Zwischenergebnisse vorgestellt, die Strategie und die Inhalte für TD-Arbeit unter Pandemiebedingungen erörtert und angepasst sowie die Arbeit an TAP-übergreifenden Themen (human factors, Ungewissheiten) geplant. Im Rahmen einer Weiterbildungsveranstaltung für alle TRANSENS-Mitarbeiter wurden Methoden und Inhalte des Safety Case vorgestellt (September 2020). Weiterhin wurde ein TD-Training („10 steps“) durchgeführt. Die Unterwebsite für das TAP wurde entwickelt.

Zwei Fokusgruppen-Veranstaltungen zu den Prämissen und Dimensionen eines Safety Case (September 2020 in Präsenz, Dezember 2020 online) fanden statt, an deren Konzeption, Organisation, Durchführung, Gestaltung des Inputs (u. a. Impuls sowie Meilenstein M12) und Auswertung (bislang nur für die erste Veranstaltung) das IELF beteiligt war. Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Arbeitstreffens durch das IELF präsentiert.

LfDG: Mit dem Code FLAC<sup>3D</sup> 7.0 wurde ein reduziertes Lokalmodell erstellt. Anhand dieses Modells wurden mechanische, thermische und thermo-mechanisch gekoppelte Berechnungen durchgeführt. Aufgrund numerischer Instabilitäten des Stoffmodells CWIPP für die Simulation des Versatzmaterials Salzgrus wurde ein neues Stoffmodell entwickelt. Die Weiterentwicklung des FTK-Simulators (Kopplung der Simulatoren FLAC<sup>3D</sup> 7.0 und TOUGH2), wurde durchgeführt. Darüber hinaus wurde ein Lokalmodell eines 2-Sohlen-Endlagerbergwerks erstellt. Als Ergebnis aus der Literaturrecherche zu soziotechnischem Monitoring wurde eine Arbeitsgrundlage zur Information der AGBe verfasst. Eine Bachelorarbeit zur Thematik des soziotechnischen Monitorings wurde betreut und erfolgreich abgeschlossen. Auf der Basis einer Literaturrecherche wurden als sicherheitsrelevant erachtete Zustandsgrößen für das geotechnische Nahfeld-Monitoring identifiziert.

risicare: Im September wurde die als Teil von Modul 1 vorgesehene Literaturstudie zu Ungewissheiten im Safety Case abgeschlossen. Der Arbeitsbericht befindet sich zurzeit im internen Reviewprozess. risicare unterstützte die Fokusgruppen im TAP SAFE und koordinierte Aktivitäten zum TAP-übergreifenden Thema „Ungewissheiten“.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

IELF: Das für März 2021 geplante Projekttreffen wird Covid-19-bedingt erst im Sommer durchgeführt, zum vorgesehenen Zeitpunkt findet nun ein Online-Arbeitstreffen statt. Zur Verwaltung der Informationen von Ergebnissen wird eine Ergebnisdatenbank fertiggestellt. Die zweite Fokusgruppe wird ausgewertet. Es wird eine Synthese aus beiden Veranstaltungen entwickelt sowie Schlussfolgerungen für die TD-Arbeit erarbeitet. Der Meilenstein M2 sowie eine Studienarbeit zu Modul SAFE-4 werden abgeschlossen.

LfDG: Im Anschluss an die thermo-mechanisch gekoppelten Simulationen mittels FLAC<sup>3D</sup> 7.0 am reduzierten Lokalmodell im Steinsalz, sollen thermisch-hydraulische Simulationen mittels des FTK-Simulators, ebenfalls am reduzierten Lokalmodell im Steinsalz, durchgeführt werden. Darüber hinaus sollen die multiphysikalischen Simulationen auf das Lokalmodell im Steinsalz erweitert werden. Für den Diskurs zu soziotechnischem Monitoring mit der AGBe und die Optimierung der Darstellung von Simulationsergebnissen sollen eine Website sowie ein Format erarbeitet werden, welches den transdisziplinären Austausch fördert.

risicare: 2021 soll eine vertiefende Literaturstudie zu anthropogenen Ungewissheiten durchgeführt und die Beteiligung an der Vorbereitung und Durchführung der TD-Experimente mit der AGBe ausgebaut werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Christian-Albrecht-Platz 4, 24118 Kiel		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11849B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.375.945,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Ott	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär geforscht werden: Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden.

Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert (Transdisziplinaritätsforschung). Spezielle Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt.

Die Antragstellenden der CAU sind Projektpartner im TAP DIPRO.

Dialog und Diskurs sind Schlüssel zur Verständigung. Wie muss der langwierige Prozess gestaltet werden, um dafür gute Bedingungen auf dem Entsorgungspfad zu schaffen? Das ist Gegenstand der transdisziplinären Forschung im TAP DIPRO.

Am Philosophischen Seminar und am Institut für Informatik werden in interdisziplinärer Kooperation (i) Narrative des Entsorgungsdiskurses analysiert, (ii) eine Theorie von "wicked communication" entwickelt, (iii) gesellschaftliche Steuerungsmedien bewertet, (iv) Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Entsorgungsprozesses wissenschaftstheoretisch untersucht und über Visualisierungen für den transdisziplinären Forschungsmodus aufbereitet, unterstützend wird hierzu (v) eine Multimediawerkstatt aufgebaut.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Arbeitsprogramm in DIPRO zeichnet sich durch eine disziplinäre Aufbereitung von Sachverhalten, die interdisziplinäre Verständigung darüber und im Kern der Forschungsarbeit durch Workshops aus, bei denen verschiedene transdisziplinäre Formate entsprechend der Themensetzung zur Anwendung kommen werden. Im ersten Projektjahr soll zudem eine eigens für DIPRO gebildete Begleitgruppe aus wenigen Laien eingesetzt werden, die die Gestaltung und die Inhalte der Workshops über die Projektlaufzeit hin reflektiert.

Die zentralen Forschungsfragen, die DIPRO an die Begleitgruppe und die Workshops stellt, sind:

1. Welche normativen Voraussetzungen, praktischen Anforderungen und gesellschaftlichen Erwartungen gilt es, für ein gerechtes und resilientes Verfahren und den jeweiligen Entsorgungspfad zu berücksichtigen?
2. Welche gesellschaftlichen Erwartungen und Ansprüche an eine zielführende Endlager-Governance und Öffentlichkeitsbeteiligung lassen sich identifizieren und wie können diese in politische Maßnahmen einfließen?

3. Wie ist das Standortauswahlverfahren unter Bedingungen von „wicked problems“ und „wicked communication“ im Sinne von „good governance“ auszugestalten?

Neben anwendungsorientierter Grundlagenforschung (desk-research, Experimente) bestehen die wesentlichen Arbeitspunkte des Kieler Teilprojektes in der Entwicklung, Durchführung und Evaluation transdisziplinärer Formate (Workshops, Multimediawerkstatt, Informationsdesigns). Inhaltliche Schwerpunkte liegen auf Verfahrensgerechtigkeit, Kommunikation und Standortverantwortung.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- Weiterentwicklung Kommunikationsstrukturen innerhalb DIPRO
- Fortsetzung Aufarbeitung des Forschungsstandes inter- und transdisziplinärer Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle
- Schulung in TD-Beobachtung
- Stellenbesetzung: Dr. Ole Kliemann (ab 01.09.2020)
- Weiterentwicklung des TD-Konzeptes
- Auswahl und Besetzung der DIPRO-Begleitgruppe; Durchführung von zwei Arbeitstreffen online
- Kooperation und Vortrag auf dem Jahrestreffen zu Narrativen und Social Media (M. Berg, P. Bräuer und M. Rossmann)
- Erstellen von Textbeiträgen für den 1. Arbeitsbericht (Gerechtigkeit, Narrative, Ontologien, Framing, Abwägung, Dialog)
- Workshop im Rahmen des REFORM-Group-Meetings in Raitenhaslach (26./27.08.2020)
- Vorbereitungen Workshop B zum Wicked Problem im Naturkundemuseum Berlin, November 2020 (verschoben wg. Pandemie)
- Einrichtung Multimedia-Werkstatt

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Inhaltliches Treffen mit Begleitgruppe (Frühling 2021)
- Workshop B zum Wicked Problem im Naturkundemuseum Berlin, voraussichtlich Juni 2021
- Konferenzbeiträge
- Vorbereitungen Workshop C (geplant Herbst 2021)

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Konrad Ott (2020): Zur Einlagerung hochradioaktiver Reststoffe aus ethischer und politischer Sicht: Bestandsaufnahme und Ausblick. In: Horatschek, A. M. (Hrsg.): *Competing Knowledges - Wissen im Widerstreit*. (Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften in Hamburg 9). De Gruyter, S. 171-188 (open access)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Freie Universität Berlin, Kaiserswerther Str. 16-18, 14195 Berlin	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11849C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt C	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 991.894,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Brunnengräber

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS wird transdisziplinär geforscht: Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP), eingebunden. Die Analyse der transdisziplinären Forschungsaktivitäten soll Hinweise liefern, wie die Kommunikation zwischen Wissenschaft und den Beteiligten des Standortauswahlverfahrens und der Bevölkerung verbessert werden kann. Spezielle Aktivitäten zielen auf Aus- und Weiterbildung sowie auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die FU Berlin ist zentral am TAP DIPRO beteiligt: Dialoge und Prozessgestaltung in Wechselwirkung von Recht, Gerechtigkeit und Governance.

Untersucht werden in interdisziplinärer Kooperation und mittels transdisziplinärer Formate:

- Narrative und Frames der Entsorgungsdiskurse/wicked communication,
- Charakteristika von wicked problems aus dialogischer Perspektive,
- Wissensbestände und vertrauensbildende Wissensaufbereitung und –vermittlung sowie
- Formen und Medien der Regulierung.

Die FU Berlin ist zudem in die Transdisziplinäre Begleitung eingebunden (TD-Begleitung). Hier erfolgt die formative und reflektierende Begleitung der TAP-Forschenden und der am Forschungsprozess beteiligten Öffentlichkeit wie der außerakademischen Akteure.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Entwicklung und Fertigstellung eines „Fact Sheet“ als interne Grundlage für die Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
- Besetzung der beiden PhD-Stellen in TRANSENS zum 01.11.2020

DIPRO:

- Konzeption, Organisation und Durchführung eines 24-Stunden DIPRO-Workshops back-to-back im Rahmen des 24. Reform Group Meetings in Raitenhaslach, Bayern (Hybrid)
- Ausarbeitung von Texten für den „DIPRO-Arbeitsbericht“ zu den Themen: Kompensation, Akzeptabilität sowie Narrative/wicked communication (zus. mit TUB)

- Fertigstellung von zwei Manuskripten zur Veröffentlichung in Brohmann et al. (Hrsg.) (2021): (1) Mez/Häfner: Nukleare Technopolitik in der BRD, (2) Sieveking/Brunnen-gräber: Der socio-technical Divide im Endlagerdiskurs (transcript)
- Fertigstellung eines Manuskriptes: „Alles falsch gemacht? Machtasymmetrien in der Öffentlichkeitsarbeit zur Endlagersuche“, für das Forschungsjournal Soziale Bewegungen
- Erarbeitung und Weiterentwicklung des Konzeptpapiers zu den Kriterien der Mitgliederauswahl sowie zur Beteiligung der DIPRO-Begleitgruppe im TAP
- Mitwirkung an der Besetzung und Arbeit der DIPRO-Begleitgruppe (konstituierende Sitzung, Onlinekonferenz mit Begleitgruppe etc.)
- Konzeption und Vorbereitung des Workshop B im Museum für Naturkunde (MfN) im DIPRO-Team und in engem Kontakt mit dem MfN (im Sept. wurde der Workshop Corona-bedingt abgesagt und wird möglichst im November 2021 nachgeholt)
- Arbeit an peer-reviewed Veröffentlichungen: Thema der Papiere sind 1. Transdisziplinarität, 2. Gender-Dimensionen der bundesdeutschen Endlager-Governance, 3. Kompensation und 4. Dialog und Gerechtigkeit in der Endlagerdebatte

#### BegleitTeam.TD:

- Fertigstellung der Konzeptskizze TD zur Systematisierung der Begleitforschung bis 2024
- Sichtung aktueller Literatur zur Transdisziplinaritätsforschung und erster Entwurf für eine Veröffentlichung zu „TD und Endlager-Governance“
- TelKos zur Abstimmung und online Treffen mit TD-Beauftragten

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Mitarbeit an der Fertigstellung des DIPRO-Arbeitsberichts, siehe oben
- Fertigstellung des Manuskripts zu „Transdisziplinarität“
- Ggf. Organisation des Workshop B und Anpassung an die Rahmenbedingungen
- Weiterarbeit an drei geplanten peer-reviewed Veröffentlichungen: Diskurs, Gender und Kompensation
- Fertigstellung der Exposés beider Doktorand\*innen
- Verstetigung der Zusammenarbeit zwischen TD-Beauftragten und BegleitTeam.TD
- Erarbeitung neuer kreativer TD-Formate, die im TAP online anwendbar sind

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Brunnengräber, A. (2020): Narrative im Umgang mit den Ewigkeitslasten, Online-Konferenz am 05.10.2020

Di Nucci, M. R. (2020): Confidence gap or path dependency? The siting process for radwaste in Germany? Vortrag auf dem 24. Reform Group Meeting in Raitenhaslach, 26.08.2020

Häfner, D. (2020): Actual discourse and narratives in Germany. Vortrag auf dem 24. Reform Group Meeting in Raitenhaslach, 27.08.2020

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11849D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 550.967,50 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Metz	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland geforscht werden. Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden. Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert (Transdisziplinaritätsforschung). Spezielle Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Schwerpunkte der Arbeiten des KIT-INE liegen im Modul „Pfadabhängigkeit als Risiko und Herausforderung“ des TAP „HANDlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren“ (HAFF).

Unsere Arbeiten gliedern sich in das

AP1: „Sicherung von Handlungsfähigkeit im Standortauswahlverfahren und der Betriebsphase“ und das

AP2: „Technische und verfahrenstechnische Komponenten von Entsorgungspfaden und deren Nebenfolgen“.

In diesem Modul werden von uns Fragestellungen überprüft, die im Kontext des Standortauswahlverfahrens für Wärme entwickelnde Abfälle hinsichtlich Reflexivität und Reversibilität des Verfahrens von besonderer Bedeutung sind. Hierzu werden Arbeiten zur Zwischenlagerung und Entwicklung von Tiefenlagersystemen unter Berücksichtigung der technischen Barrieren und deren Implikationen durchgeführt, wobei insbesondere die Verzahnung von Infrastruktur-, Strahlenschutz- und Betriebssicherheitsaspekten verschiedener Komponenten des Entsorgungspfads analysiert werden. Im weiteren Verlauf des Verbundvorhabens soll gemeinsam mit Partnern des TAP HAFF Haltepunkte definiert werden, an denen der jeweilige Sicherheitsstatus eines Entsorgungspfads überprüft und ein Dialog mit der Bevölkerung angestrebt wird.

Zusammenarbeit im Forschungsverbund TRANSENS: Das Arbeitspaket 2 „Technische und verfahrenstechnische Komponenten von Entsorgungspfaden und deren Nebenfolgen“ wird durch einen Mitarbeiter des KIT-INE geleitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Aufbauend auf einer vertieften Literaturrecherche und Sammlung veröffentlichter Dokumente zur Zwischen- und Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle wurden Informationen zu Transport- und Lagerbehältern, deren Inhalt (abgebrannter Kernbrennstoff; Glaskokillen) sowie existierenden bzw. geplanten Lagerungssysteme zusammengestellt. Im nächsten Arbeitsschritt wurden zwei Texte erstellt, in denen Grundzüge zu Verzahnungen und Interdependenzen möglicher Entsorgungspfade genannt werden. Der Fokus unserer Arbeiten im zweiten Halbjahr 2020 und im Jahr 2021 liegt auf der Analyse technischer Barrieren sowie die Verzahnung von Infrastruktur-, Strahlenschutz- und Betriebssicherheitsaspekten verschiedener Komponenten des Entsorgungspfad. Im Abstimmung mit anderen Teams des Arbeitspakets TAP HAFF wurden Schnittstellen und Kooperationen identifiziert und in drei Kristallisationskerne „K1“, „K2“ und „K3“ ausformuliert: „K1“ Verzahnungen und Interdependenzen langfristiger Entsorgungspfade – Analyse, grafische Darstellung und Illustration, „K2“ Haltepunkte – Erwartungen und Optionen der Ausgestaltung und „K3“ Soziotechnische Wissenskonflikte – Voraussetzungen für ein lernendes Verfahren. Wir beteiligten uns hauptsächlich an Arbeiten zu „K1“ und im eingeschränktem Umfang zu „K2“. Gemeinsam mit Mitarbeitenden aller Arbeitsgruppen des TAP HAFF wurde aufbauend auf unserer Stichpunktliste begonnen, an einem Thesenpapier zum Kristallisationskern „K1“ zu arbeiten.

F. Becker (der TD-Beauftragte des KIT-INE) und V. Metz beteiligten sich an einer Reihe von virtuellen Treffen (Videogesprächen) zum TRANSENS-Projekt, der transdisziplinären Arbeit und dem TAP HAFF. Dazu gehören das TAP HAFF Gesamttreffen am 1. Juli 2020; ein Treffen am 14. Juli 2020 zu Absprachen im HAFF-Kernteam für Sommer/Herbst 2020; die Vorbereitung des TRANSENS-Arbeitstreffens am 26. Oktober 2020; ein Treffen am 29. Oktober 2020 zur transdisziplinären Begleitforschung; das TRANSENS- Gesamttreffens vom 2. bis 4. November 2020; das erste TD-Beauftragten Treffen am 9. November 2020 sowie am 8. Dezember 2020 das TRANSENS-Bearbeiter Treffen und die HAFF-Kernteam Besprechung am 9. Dezember 2020.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im ersten Halbjahr 2021 soll ein Bericht zu identifizierten Verzahnungen und Interdependenzen langfristiger Entsorgungspfade erstellt werden. Darauf aufbauend soll eine grafische Darstellung Illustration potentieller, verzweigter Entsorgungspfade entwickelt werden.

Die Auswahl, Einstellung und Einarbeitung einer geeigneten Kandidatin oder eines geeigneten Kandidaten für die Promotionsstelle wurde aufgrund der Einschränkungen durch COVID-19 bedingt auf 2021 verschoben.

Neben einigen virtuellen Treffen im Arbeitspaket TAP HAFF sind Beiträge beim Treffen des TRANSENS-Gesamtprojekts im Januar 2021 vorgesehen. F. Becker und V. Metz werden sich weiterhin mit anderen Kolleginnen und Kollegen von TAP HAFF Teams an der „Endlagerung-Nano-Lesegruppe“ zu TRANSENS relevanten Themen beteiligen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bisher wurden zwei interne Thesenpapieren zu Themen des Moduls „Pfadabhängigkeit als Risiko und Herausforderung“ und eine Stichpunktsammlung und deren Verschriftlichung zur Entwicklung einer grafischen Darstellung der Entsorgungspfade in TRANSENS erstellt.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11849E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 2.720.831,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hocke-Bergler	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland geforscht werden. Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden. Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert (Transdisziplinaritätsforschung). Spezielle Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die ITAS-Schwerpunkte liegen im TAP HAFF und im TAP DIPRO. Wir leisten Grundlagenforschung zu Fragen der Reversibilität und des gesellschaftlichen Dialogs, die im deutschen Standortauswahlverfahren eine besondere Rolle spielen.

TAP HAFF: „HANDlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren“ mit den Themen Pfadabhängigkeit als Risiko und Herausforderung, Raumwirkungen vor dem Hintergrund von Endlager-Governance sowie technische und verfahrenstechnische Komponenten von Entsorgungspfaden und deren Nebenfolgen.

TAP DIPRO: „Dialoge und Prozessgestaltung in Wechselwirkung von Recht, Gerechtigkeit und Governance“, mit dem Thema Gerechtigkeit als Ausgangspunkt. Gerechtigkeitsfragen haben insbesondere bei Projekten wie der Standortsuche und der Realisierung eines Endlagers einen hohen gesellschaftlichen Stellenwert.

Zusammenarbeit im Forschungsverbund:

Mit dem TAP SAFE wird empirisch kooperiert. Ebenso kooperiert ITAS im Rahmen der Transdisziplinaritätsforschung mit den TD-Experten innerhalb des Forschungsverbundes (I-TD und BegleitTeam.TD). ITAS ist im Sprecherteam des Forschungsverbundes ebenso vertreten wie in der I-TD (2 Mitarbeiter). TAP HAFF und TAP DIPRO werden jeweils durch einen ITAS-Mitarbeiter geleitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

TAP HAFF: Aufbauend auf den Eingrenzungen des TD-Verständnisses entwickelte ITAS zusammen mit den HAFF-Partnern grundlegende Vorstellungen über ein lernendes Verfahren, welches Selbstreflexivität und Wissenschaftlichkeit erfordert, um den Bedingungen von Ungewissheit und Langzeitplanung begegnen zu können. In diesem Kontext weiterentwickelt wurde die Funktion potenzieller Haltepunkte sowie die Bedeutung des konstruktiven Umgangs mit Wissenskonflikten.

Beim diesjährigen TRANSENS-Arbeitstreffen (Nov. 2020) hielten zwei ITAS-Kollegen zusammen mit INE-Vertretern einen Überblickvortrag zu HAFF. Vor internationalen Umweltpolitologen wurde ein Fachvortrag zu Transdisziplinarität bei der nuklearen Entsorgung hochradioaktiver Abfälle gehalten (Hocke; Nabitz; Scheer, 26.8.20).

Zur konzeptionellen Untermauerung wurden erste soziotechnische Einzelthemen ausgearbeitet, die z. B. für das Verständnis der Verzahnungen der Entsorgungspfade und der Akteurslandschaft wichtig sind. Weitere Vorträge wurden gehalten (Reform-Group Raitenhaslach Aug. 20) und erste Papiere sind vorbereitet. Ein weiterer Vortrag zum Stand der Transdisziplinarität in TRANSENS erfolgte beim DIPRO-Arbeitstreffen im Aug. 2020.

TAP DIPRO: Vorbereiten und Erstellen des Entwurfs eines DIPRO-Arbeitsberichts zusammen mit CAU-LPEU, der sowohl basale Grundlegungen der TAP-Fragestellung als auch vor allem die Themen „Schlüsselbegriffe“, „Transdisziplinarität im Zusammenhang mit Disziplinarität und Interdisziplinarität“ als auch „Gerechtigkeit“ sowie zu „Framing und Narrative“ erläutert (Veröffentlichung 2021). Eingereicht wurde ein Fachaufsatz zur „Artikelverordnung nach §§26, 27 Standortauswahlgesetz – Sicherheitsanforderungen. Dogmatik und Öffentlichkeitsbeteiligung“. Eine Online-Tagung „Schritte auf dem Weg zum Endlager“ wurde in Kooperation mit der Leuphana-Universität Lüneburg federführend organisiert. Beim diesjährigen TRANSENS-Arbeitstreffen (Nov. 2020) hielten zwei ITAS-Kollegen Vorträge: ein Überblicksvortrag zu DIPRO sowie den DIPRO-Vertiefungsvortrag „Narrative, Standortauswahl und Endlager“ (beide am 2.11.2020) und einen Vortrag zu Recht und Emotionen im Standortauswahlverfahren (3.11.2020).

TAP SAFE: Im 2. Halbjahr 2020 führte ITAS zusammen mit einem Teil der SAFE-Mitarbeiter ein Fokusgruppen-Veranstaltung zu den Prämissen und Dimensionen eines Safety Case durch (im Sept. 2020 als mehrstündige Live-Veranstaltung in Hannover, im Dezember 2020 mit den gleichen Teilnehmern als ganztägige Videokonferenz). ITAS übernahm Organisation, Konzeption und Moderation der Veranstaltung und steuerte die empirische Ausarbeitung und die teilnehmende Beobachtung durch eine Begleitgruppe, um aufbauend auf seinen Kompetenzen die inter- und transdisziplinäre Kooperation zu stärken. Die empirische Auswertung und der darauf aufbauende Arbeitsbericht werden im 1. Halbjahr 2021 erstellt. Erste Zwischenergebnisse wurden beim TRANSENS-Arbeitstreffen (Nov. 2020) vorgestellt (Röhlig/Ebeling, 2.11.20).

TAP EDU: Fortführung des ITAS-Textseminars zu einschlägiger Forschungsliteratur mit Ausweitung auf weitere TRANSENS-Partner.

Gesamtprojekt: Die Fortschreibung der Konzept-Entwicklung für eine wissenschaftliche Begleitung der transdisziplinären Forschung im Gesamtvorhaben wurde in Zusammenarbeit mit FFU und ETH abgeschlossen. Das Jahresmeeting des Forschungsverbundes im November 2020 wurde als Online-Konferenz mit über 60 Teilnehmern unter Federführung von ITAS und des Sprecherteams erfolgreich vorbereitet und durchgeführt.

Die Zahl der internen Workshops und transdisziplinären Veranstaltungen wurde durch die Corona-Lage verringert und das TD-Vorhaben entsprechend der Randbedingungen angepasst.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Systematisierung und Ausarbeitung der gemeinsamen Fragestellung über Arbeitsgruppen.
- Ausarbeitung von Memos zu den HAFF-Kristallisationskernen
- Planung der Empirie und der transdisziplinären Formate in den Modulen und Arbeitspaketen
- Fertigstellung zweier TRANSENS-Berichte und zweier Manuskripte aus dem DIPRO-Kontext
- Präzisierung des TD-Konzepts für DIPRO und HAFF sowie Mitarbeit bei der konzeptionellen Ausgestaltung im Gesamtverbund
- Ausbau der Weiterbildungsaktivitäten zum Thema „TA und Governance im selbstlernenden Verfahren“ sowie im TAP EDU
- Betreuung interdisziplinärer Promotionen

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Smeddinck, Ulrich (2020): Wie innovativ ist das Standortauswahlgesetz? In: BGE-Geschäftsbericht 2019, Peine, S. 44-47

Smeddinck, Ulrich, zwei einschlägige Rezensionen in der Fachzeitschrift „Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis“: „P. Rosanvallon, Die gute Regierung, Berlin 2018“ (Heft 2/2020, S. 66-67) und B. Pörksen, F. Schulz von Thun, Die Kunst des Miteinander-Redens. Über den Dialog in Gesellschaft und Politik, München 2020 (Heft 3/2020, S. 80-81)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11849F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 3.473.288,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Walther	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär geforscht werden: Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden. Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert (Transdisziplinaritätsforschung). Spezielle Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt. LUH IRS/IW und ETH Zürich tragen zu allen vier TAP bei: Flexibilität statt linearer Ablauf des Verfahrens: schrittweises Vorgehen, Haltepunkte im Verfahrensablauf, die Option von begründeten Rückschritten und die Reaktion auf neue Forschungsergebnisse sind die Themen der transdisziplinären Forschung im TAP HAFF. Dialog und Diskurs sind Schlüssel zur Verständigung. Wie muss der langwierige Prozess gestaltet werden, um dafür gute Bedingungen auf dem Entsorgungspfad zu schaffen? Das ist Gegenstand der transdisziplinären Forschung im TAP DIPRO. In einem Verfahren, das die Rückholung eingelagerter Abfälle im Falle einer ungünstigen Entwicklung des Lagers vorsieht, muss man sich frühzeitig Gedanken machen über Monitoring-Strategien, Entscheidungswege, Entscheidungsträger und Verantwortlichkeiten. Dies ist Gegenstand des TAP TRUST. Im TAP SAFE wird transdisziplinär untersucht, ob und inwieweit Sichtweisen von Nicht-Spezialisten nahelegen, das Konzept des Safety Case anzupassen oder weiterzuentwickeln, um so die Diskurs- und Beratungsfähigkeit zu verbessern.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

### IRS:

TAP TRUST: Modul 1: Übergreifender Rahmen des TAP TRUST und Leitung der AGBe  
Modul 2: Transdisziplinäre Erarbeitung eines Programms zur Umweltüberwachung  
TAP SAFE: Modul 6: Die Rolle der radioökologischen Modellierung im Safety Case  
EDU: Aus- und Weiterbildung

### IW:

TAP HAFF: Modul 1: Pfadabhängigkeit als Risiko und Herausforderung  
Modul 2: Raumwirkungen und Governance  
Modul 3: Konzeptionelle Grundlagen und Basisinformationen  
TAP DIPRO: Workshop D: Darstellung technischer Randbedingungen  
Workshop F: Transdisciplinarity meets reality – Lessons learned

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

**IRS: TAP TRUST (Modul 1):** Der Auswahlprozess geeigneter AGBe-Mitglieder endete erfolgreich. Am 26.09.2020 hat die konstituierende Sitzung der AGBe in Hannover stattgefunden. Rahmenbedingungen der Zusammenarbeit wurden in einer gemeinsam erarbeiteten Arbeitsgrundlage fixiert und von allen Beteiligten für gültig erklärt. Über die Veranstaltung mit der AGBe wurde via universitäre Websites (Uni Hannover und TRANSENS) informiert. Der aktuelle Stand der Arbeit mit der AGBe wurde auf dem TRANSENS Online-Arbeitstreffen (02.-04.11.2020) präsentiert, an dem die AGBe mehrheitlich teilnahm. Ein Arbeitsbericht dokumentiert den Rekrutierungsprozess. Am digitalen Jahresmeeting der Society for Risk Analysis (13.-17.12.2020) wurde ein Poster zum Thema Endlagerung, Vertrauen und Risikowahrnehmung vorgestellt. Mit Modul 6 (TAP SAFE) wurde noch nicht begonnen. **TAP TRUST (Modul 2):** Die eingeplante Stelle wurde am 15.07.2020 besetzt. Zuerst wurde die Realisierbarkeit einer Messstelle am präferierten Standort Samtgemeinde Elm-Asse ausgelotet. Für die geplante Installation wurde zunächst das Gespräch mit Vertretern der lokalen Bevölkerung gesucht, um über größtmögliche Transparenz zu einer frühzeitigen Akzeptanz des Vorhabens zu gelangen. Hierbei konnten die „Asse-2-Begleitgruppe“ sowie der Bürgermeister als interessierte Partner und Unterstützer des Projektes gewonnen werden. Vereinbart wurde, die Messstelle in Räumlichkeiten der Gemeinde zu betreiben. Der hierfür benötigte Detektor wurde im Dezember 2020 ausgeliefert und wird zurzeit am IRS kalibriert.

**IW:** Im TAP DIPRO wurde im Rahmen der TD-Taskforce die DIPRO-Begleitgruppe (DIPRO-BG) mit 7 Mitgliedern ins Leben gerufen. Es wurde gemeinsam mit FUB, TUB, KIT ITAS und Kiel ein Profilpapier erstellt um die TD-Arbeitsinhalte aus DIPRO zu formulieren. Basierend auf den IW-Arbeitszielen wurde die Vorbereitung einer transdisziplinären Studie im TAP HAFF mit dem ITAS zur Durchführung eines TD-Moduls begonnen. Hierbei stehen die Bezüge zwischen der Sicherheit der technischen Barriere und der dafür notwendigen Darstellungsformen und Zugangswege zur Gesellschaft im Fokus. Damit wird für diese Thematik eine Sensibilität und eine Informationskultur in der interessierten Gesellschaft aufgebaut und gleichzeitig die Seite der Wissenschaft als faktenbasierte Basis im Entsorgungspfad nicht vernachlässigt. TAP übergreifend wurde auf dem Jahrestreffen online am 02.-04.11.2020 zu den Begrifflichkeiten Ungewissheiten und Unsicherheiten zum Thema: „Zur Übertragbarkeit experimenteller Ergebnisse auf das Verhalten der Endlagerbehälter unter realen Bedingungen“ im Format einer Rede-Gegenrede referiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

**IRS: TAP TRUST (Modul 1):** Für das nächste TRANSENS-Arbeitstreffen (März 2021) werden gemeinsam mit dem LfDG der TU Clausthal (TAP TRUST, Modul 4) inhaltliche und formale Vorbereitungen zur Arbeit mit der AGBe getroffen. **TAP TRUST (Modul 2) und EDU:** Die Inbetriebnahme der Messstelle soll im ersten Halbjahr 2021 stattfinden. Da hierfür umfangreiche Dienstreisen durch Mitarbeiter des IRS notwendig sind, richtet sich der Beginn der Arbeiten vor Ort jedoch nach den weiteren Einschränkungen durch die Pandemie-Situation.

**IW:** Weitere Zusammenarbeit mit der DIPRO-Begleitgruppe zur Vorbereitung und Durchführung der geplanten Workshops. Aufbau einer Datenbasis zur Informationsmöglichkeit für die DIPRO-BG. Textarbeit zur Darstellung der TD-Arbeit mit der DIPRO-BG. Vorbereitung weiterer BG Treffen. Langfristige Vorbereitung von Workshop D „Freiwilligkeit und Kompensation“ unter Betrachtung TAP übergreifender Forschungsergebnisse, wie z. B. der Darstellung des Entsorgungspfades. Fortführung der TAP-übergreifenden Arbeiten zu Ungewissheiten und Unsicherheiten mit dem Fokus auf der Technischen Barriere. Aufbereitung einer Wissensbasis zum Thema technische Barriere zur transdisziplinären Wissensvermittlung unter dem Blickpunkt Komplexität/Vollständigkeit vs. Verständlichkeit/Vertrauen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bericht: Die Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe) im transdisziplinären Projekt TRANSENS.

Poster: A new age of nuclear waste disposal in Germany. Current findings on trust and risk perception (SRA 2020 – Risk Science for Sustainability, 13.-17.12.2020)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg im Breisgau		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11849G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt G		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 505.379,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Brohmann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär geforscht werden: Die interessierte Öffentlichkeit werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in vier Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden. Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert (Transdisziplinaritätsforschung). Weitere Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt. Die Expertise des Öko-Instituts wird insbesondere in die TAPs HAFF und SAFE einbezogen.

Das TAP HAFF fokussiert auf die Flexibilität des Verfahrens, die statt eines linearen Ablaufs, ein schrittweises Vorgehen ermöglicht, das Haltepunkte im Ablauf und die Option von Rückschritten sowie die Reaktion auf neue Forschungsergebnisse vorsieht. Das TAP SAFE fokussiert u. a. auf Fragen der Kommunikation und des Umgangs mit Ungewissheiten im Rahmen des Safety Case (SC). Dabei wird transdisziplinär untersucht, ob und inwieweit Sichtweisen von Nicht-Spezialisten nahelegen, das Konzept des SC anzupassen oder weiterzuentwickeln.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

### TAP HAFF: Handlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren

Das TAP gliedert sich in drei Module und beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- a) Literaturrecherche,
- b) Experten-Interviews zu Raumwirkungen von kerntechnischen Entsorgungsanlagen allgemein sowie zu Oberflächenanlagen des Schweizer Tiefenlagers,
- c) Leitfaden-Interviews zur Kriterienentwicklung für die Bewertung potenzieller Auswirkungen von Haltepunkten und Rückschritten,
- d) Analyse der Interviews: Katalog potenzieller Auswirkungen von Haltepunkten und Rückschritten sowie Kriterien der Bewertung; raum- und zeitbezogene Muster zur Entwicklung partizipativer Ausgestaltungsempfehlungen; Erfahrungen aus dem Schweizer Fall,
- e) Transdisziplinärer Workshop mit Stakeholdern und interessierter Öffentlichkeit zur Prüfung und Weiterentwicklung der konzeptionellen Ideen,
- f) Synthese der Ergebnisse und Entwicklung von Handlungsempfehlungen zum Umgang mit raumzeitlichen Spezifika unter Berücksichtigung von Haltepunkten und Rückschritten.

### TAP SAFE: Stakeholder-Perspektiven und Transdisziplinarität

Das TAP gliedert sich in sieben Module, an vier Modulen ist das Öko-Institut beteiligt.

In SAFE 2 wird ein Beitrag zur methodischen Konzeption für die empirischen Untersuchungen des TAP mit transdisziplinärem Ansatz entwickelt. In SAFE 3 unterstützt das Öko-Institut mit transdis-

ziplinären Arbeiten die Erfassung von Akzeptabilitätskriterien für einen SC. Geplant sind Fachworkshops, Expertendialoge sowie Workshops mit Öffentlichkeit. SAFE 4 widmet sich der Ergebnisdarstellung und Vermittlung von Modellrechnungen unter Einbeziehung kommunikativer Anforderungen. SAFE 7 widmet sich der Auswertung und der Entwicklung von Empfehlungen der fortlaufenden Beobachtungen der Module 2, 3 und 4.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ab März wurden aufgrund der Covid 19 Pandemie virtuelle Treffen durchgeführt, wie das Arbeitstreffen des Gesamtvorhabens vom 2.11. bis 4.11.2020 oder das Treffen der Td Beauftragten am 26.11.2020.

#### TAP HAFF:

Im Rahmen der entwickelten TAP Struktur wurden unter dem Aspekt Schnittstellen und Kooperationen die drei Kristallisationskerne Verzahnung, Haltepunkte und Wissenskonflikte inhaltlich bearbeitet.

Modul 2: Vortrag am Arbeitstreffen: „Die Bedeutung von Raum und Raumwirkungen bei der Infrastrukturvorhabenplanung“; Weiterentwicklung des Forschungsdesigns von Modul 2; Beginn des Literaturreviews zu Raumwirkungen und Vorbereitungen für die Experteninterviews.

Modul 3: Bearbeitung von AP3 Fallstudie zu Oberflächenanlagen in der Schweiz.

#### TAP SAFE:

Fachliche Begleitung der ersten Arbeitspakete;

konzeptionelle Überlegungen zur interdisziplinären Diskussion und Berücksichtigung von Handlungsmodellen zu „menschlicher Faktor“, gemeinsam mit dem Team Sträter (Uni Kassel) sowie Smeddinck (ITAS) (TAP übergreifend); dazu Informations- und Vermittlungsbedarf in einem ersten Format (Webinar) adressiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Weitere Arbeitstreffen im 1. Hj. 2021 werden überwiegend virtuell geplant. In den einzelnen Arbeitspaketen sind folgende Tätigkeiten vorgesehen:

TAP HAFF: An den gemeinsam identifizierten Schnittstellen wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit weiter vorangetrieben. In Modul 1 wird eine grafische Darstellung des Entsorgungspfades entwickelt. In Modul 2 wird der Literaturreview fortgesetzt und das empirische Arbeitskonzept abschließend HAFF-intern diskutiert und Kooperationen abgestimmt. Die Expert\*innen für die Interviews wurden angefragt, Durchführung und Auswertung im 1. Quartal 2021 geplant. Es folgt die Auswahl der zu untersuchenden Fallbeispiele und die konzeptionelle Planung und Umsetzung des ersten Td-Formats. In Modul 3 wird die Fallstudie zu den Oberflächenanlagen in der Schweiz erstellt.

TAP SAFE: In SAFE 2 werden die Vorschläge aus dem Impuls über sozialwissenschaftliche Aspekte mit anderen Teams diskutiert und entsprechend angepasst und in die weitere Arbeit eingebunden. Für SAFE 3 sowie übergreifend, werden Handlungsmodelle im Hinblick auf die Berücksichtigung des „menschlichen Faktors“ in unterschiedlichen sicherheitsrelevanten Kontexten eingeordnet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11849H</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt H		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 362.577,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. von Hirschhausen	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär geforscht werden: Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden.

Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert (Transdisziplinaritätsforschung). Spezielle Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt.

Dialog und Diskurs sind Schlüssel zur Verständigung. Wie muss der langwierige Prozess gestaltet werden, um dafür gute Bedingungen auf dem Entsorgungspfad zu schaffen? Das ist Gegenstand der transdisziplinären Forschung im TAP DIPRO.

Das Fachgebiet für Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik erarbeitet im TAP DIPRO auf der Grundlage disziplinärer und interdisziplinärer Forschung eine Bewertung der volkswirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit von Organisationsmodellen bzw. Governance-Strukturen an der Schnittstelle zwischen den Prozessen des Rückbaus, der Lagerung und der Standortsuche. Unter Berücksichtigung ingenieurwissenschaftlicher Erkenntnisse sollen mögliche Synergieeffekte und Hindernisse, die eventuell Verzögerungen oder Kostensteigerungen verursachen könnten, herausgearbeitet werden. Des Weiteren erarbeitet bzw. eruiert das Fachgebiet, basierend auf Wissen über monetäre und nicht-monetäre Anreizstrukturen, in Kooperation mit anderen Partnern verschiedene Kompensationsszenarien und gesellschaftliche Möglichkeiten distributiver Gerechtigkeit im Umgang mit Lasten- und Verantwortungsverteilung.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Arbeitsprogramm des TAP Dipro gliedert sich in drei Module, wovon ein Modul der wissenschaftlichen Vorbereitung und ein Modul der Synthese dient. Im Zentrum steht das Praxismodul mit einer Reihe aus drei Workshops für Teilnehmer aus dem nicht-akademischen Bereich, in denen jeweils unterschiedliche Aspekte von Gerechtigkeit, Recht und Governance behandelt werden. Bei der Workshop-Organisation wechseln sich die DIPRO-Partner ab. Alle Projektpartner (im TAP DIPRO) sind bei den Workshops vertreten.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Teilnahme am DIPRO Workshop in Raitenhaslach am 04. und 05. August 2020 mit Fachvortrag vom Mitarbeiter Ben Wealer im Rahmen des gleichzeitig tagenden REFORM Group Meetings
- „DIPRO-Begleitgruppe“: Der Mitarbeiter Fabian Präger arbeitet in der AG-Laienbegleitgruppe an der Konzipierung der Laienbegleitgruppe mit. Es wurden Personen anhand der erarbeiteten Kriterien rekrutiert und die Gruppe organisiert sowie Ziele, Aufgaben und Arbeitsweise der Gruppe erarbeitet. An 2 Wochenend-Workshops (14.11.2020 und 12.12.2020) wurden die Gruppe konstituiert. Diese Workshops dienten dem Kennenlernen untereinander (AG-Laienbegleitgruppe und DIPRO-Begleitgruppe), der Vorstellung von DIPRO, der Klärung von Aufgabenbereichen der DIPRO- Begleitgruppe und Verständigung untereinander. Gleichzeitig wurden diese Treffen bereits von TD-Beobachtenden begleitet und ausgewertet.
- Aufgrund der Pandemie-Situation und die damit verhängten Verbote für Reisen und Treffen führten zur Absage des Workshop B (Meilenstein 7) und stellen eine Herausforderung zur Erstellung von Alternativkonzepten (online), welche Präsenzworkshops nur teilweise ersetzen können. Gleichzeitig wurde dieses Alternativkonzept entwickelt und aktuell noch weiter ausgearbeitet, um sich auf Grund der sich ändernden Beschränkungen in der Pandemie anpassen zu können.
- Erstellung des Textes „Narrative und Gegen-Narrative – ein Bestandteil der wicked communication“ von Achim Brunnengräber und Christian von Hirschhausen als Beitrag für den Arbeitsbericht.
- Interner Review-Prozess von Texten des Arbeitsberichts: Dabei wurden Beiträge der Mitarbeitenden im TAP DIPRO von einer fachfremden Person gegengelesen, kommentiert und auf Verständlichkeit für fachfremde Leser\*innen überprüft.
- Regelmäßige Telkos (Zoom oder BigBlueButton) für Abstimmungen im TAP DIPRO
- Der Mitarbeiter Ben Wealer nimmt regelmäßig an Telkos im Rahmen der DIPRO 4er Runde zur Planung und Vorbereitung von Entscheidungen Teil
- Teilnahme am TRANSENS Arbeitstreffen (02. – 04.11.2020), welches online stattgefunden hat
- Einstieg in Kommunikation über „Slack“ für DIPRO
- Festlegung diverser Zuständigkeiten

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Alternativkonzept für den Workshop B (Meilenstein 7) in Kooperation mit FU Berlin
- Organisation von TRANSENS Arbeitstreffen im Herbst 2021 an der TU Berlin
- Erste Veröffentlichung geplant mit Arbeitstitel “Wem gehört der Atommüll?“ zu rechtlichen, ökonomischen und Gerechtigkeits-Fragestellungen.
- Start des Arbeitsteilprogramms zum Themenkomplex „wicked financing“

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Narrative und Gegen-Narrative – ein Bestandteil der wicked communication“ von Achim Brunnengräber und Christian von Hirschhausen als Beitrag für den Arbeitsbericht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Universitätsplatz 2, 38106 Braunschweig		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11849I</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt I		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.239.091,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Stahlmann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Verbundvorhaben TRANSENS wird erstmalig in Deutschland transdisziplinäre Forschung zur nuklearen Entsorgung in größerem Maßstab betrieben. Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden:

- HAFF: Handlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren
- SAFE: Safety Case: Stakeholder-Perspektiven und Transdisziplinarität
- TRUST: Technik, Unsicherheiten, Komplexität und Vertrauen
- DIPRO: Dialoge und Prozessgestaltung in Wechselwirkung von Recht, Gerechtigkeit und Governance

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

In einem Verfahren, das die Rückholung eingelagerter Abfälle im Falle einer ungünstigen Entwicklung des Lagers vorsieht, muss man sich frühzeitig Gedanken machen über Monitoring-Strategien, Entscheidungswege, Entscheidungsträger und Verantwortlichkeiten. Dies ist Gegenstand des TAP TRUST.

Flexibilität statt linearer Ablauf des Verfahrens: schrittweises Vorgehen, Haltepunkte im Verfahrensablauf, die Option von begründeten Rückschritten und die Reaktion auf neue Forschungsergebnisse sind die Themen der transdisziplinären Forschung im TAP HAFF.

Dialog und Diskurs sind Schlüssel zur Verständigung. Wie muss der langwierige Prozess gestaltet werden, um dafür gute Bedingungen auf dem Entsorgungspfad zu schaffen? Das ist Gegenstand der transdisziplinären Forschung im TAP DIPRO.

Das IGG der TU Braunschweig ist in TAP TRUST eingebunden und bearbeitet Fragestellungen zu Monitoring und zur Akzeptabilität von Ungewissheiten während der Beobachtungsphase und einer Rückholung.

Das iBMB der TU Braunschweig ist in den TAPs HAFF und DIPRO eingebunden und entwickelt und visualisiert dazu idealtypische Konzepte für obertägige Anlagen von Endlagern. Dabei wird der komplette Lebenszyklus der Bauwerke betrachtet. Wesentliches Element ist dabei ein lernfähiges Lebenszyklusmanagementsystem.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Am 26.09.2020 konnte sich die AGBe unter entsprechenden Hygienemaßnahmen in Präsenz zur Konstituierung treffen. Hier wurde vom IGG das Modul 3 von TRUST vorgestellt und die Inhalte mit der AGBe diskutiert. Die vertiefte Diskussion zum Demonstrator Rückholung wurde auf die dritte Sitzung der AGBe im Herbst 2021 gelegt. Zum Jahresmeeting von TRANSENS (2.-4.11.2020) wurde das TAP-übergreifende Thema „Ungewissheiten“ im Format Rede-Gegenrede diskutiert. Dabei wurden vom IGG die Verkettungen der Ungewissheiten in der geotechnischen und geologischen Barriere dargestellt und die notwendigen Vereinfachungen in der Modellbildung zur Prognose der Entwicklung eines Tiefenlagers aufgezeigt. Die Ergebnisse werden in einem TRANSENS-Arbeitsbericht zusammengefasst. Die Weiterbildung Tiefenlagerung (14.12.-18.12. und 11.-15.1.21) konnte dieses Jahr als virtuelle Veranstaltung angeboten werden.

Das Vorbereitungstreffen im TAP HAFF am 26.10., das TRANSENS-Jahresmeeting vom 2. - 4.11., das Meeting der TD-Beauftragten am 9.11. sowie das Bearbeitertreffen am 8.12. fanden online statt. Neben diesen Treffen wurde weiter an der Ausgestaltung der interdisziplinären Zusammenarbeit der Projektpartner im TAP HAFF um die Kristallisationskerne: Entsorgungspfade – Analyse, grafische Darstellung & Illustration; Erwartungen und Optionen der Ausgestaltung sowie Soziotechnische Wissenskonflikte – Voraussetzungen für ein Lernendes Verfahren gearbeitet. Am iBMB wurde die Analyse von Konzepten für obertägige Anlagen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle weiter vertieft. Im Hinblick auf mögliche Schädigungsmechanismen und Ansätze für die Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauteilen eines Eingangslagers sowie dessen Konzeptionierung laufen parallel studentische Arbeiten.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die TU Braunschweig ist virtueller Gastgeber bei einem TRANSENS-Arbeitstreffen von 15.03.-17.03.2021. Zum Herbsttreffen der AGBe soll das Thema Rückholung intensiv diskutiert werden. Als Vorbereitung dafür sind vom IGG Experteninterviews und numerische Modellierungen vorgesehen. Zu dem TAP-übergreifenden Thema Ungewissheiten ist ein Arbeitsbericht vorgesehen, in den der Beitrag zur „Ungewissheiten-Ketten“ ein wesentlicher Bestandteil sein wird. Der Stand der Arbeiten des IGG zum diesem Thema wird auf der virtuellen Tagung der EGU Ende April vorgestellt.

Das iBMB beteiligt sich an der Ausgestaltung der TD-Elemente und entwickelt dazu parallel idealtypische Konzepte für obertägige Anlagen von Tiefenlagern bestehend aus Eingangslager mit Konditionierungsanlage sowie dessen Infrastruktur und der baulichen Transportinfrastruktur unter Tage. Auf Basis der Literaturrecherche zur Ableitung baulicher Kriterien für obertägige Anlagen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland wird eine (zunächst interne) Datenbank angelegt. Dabei werden neben internationalen Konzepten ebenfalls die Aspekte der Lebensdaueranalyse, Dauerhaftigkeit und des Monitorings berücksichtigt. Darüber hinaus sind weitere studentische Arbeiten geplant.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Kassel, Mönchebergstr. 19, 34125 Kassel		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11849J</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt J		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2024	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 327.569,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Sträter	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In TRANSENS soll transdisziplinär geforscht werden: Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden planvoll in Forschungskontexte, konkret in vier Transdisziplinäre Arbeitspakete (TAP) eingebunden. Die Möglichkeiten transdisziplinärer Forschung in der nuklearen Entsorgung werden im Verbund systematisch reflektiert; spezielle Aktivitäten zielen auf Nachwuchsförderung und Kompetenzerhalt.

Im TAP HAFF soll Flexibilität statt ein linearer Ablauf des Verfahrens erarbeitet werden durch ein schrittweises Vorgehen, mit Haltepunkten im Verfahrensablauf, der Option von begründeten Rückschritten und Reaktion auf neue Forschungsergebnisse.

Im TAP SAFE wird untersucht, ob und inwieweit Sichtweisen von Nicht-Spezialisten nahelegen, das Konzept des Safety Case anzupassen oder weiterzuentwickeln, um so die Diskurs- und Beratungsfähigkeit zu verbessern. Weiterhin wird untersucht, ob und inwieweit Sichtweisen von Nicht-Spezialisten nahelegen, das Konzept des Safety Case anzupassen oder weiterzuentwickeln, um so die Diskurs- und Beratungsfähigkeit zu verbessern.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Fachgebiet Arbeits- und Organisationspsychologie beteiligt sich insbesondere am TAP HAFF und TAP SAFE mit folgenden Arbeitspaketen:

- HAFF AP1: Psychologische Aspekte bei der Entscheidungsfindung für Haltepunkte und Rückschritte.
  - HAFF AP2: Unterstützung des schrittweisen Verfahrens hinsichtlich einer positiven Sicherheits- und Fehlerkultur.
  - HAFF AP3: Anwendung der Methodik auf Szenarien.
- sowie
- SAFE AP1: Bestandsaufnahme ganzheitlicher, systemischer Effekte der menschlichen Zuverlässigkeit auf den Umgang mit Sicherheitsanforderungen.
  - SAFE AP2: Methode zur Berücksichtigung der Aspekte der menschlichen Zuverlässigkeit in den Einschätzungen und Bewertungen von Ungewissheiten.
  - SAFE AP3: Anwendung der Methodik auf Modellrechnungen und Ergebnisdiskussionen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

HAFF AP1: Das Arbeitspapier zur Bewertungsmethode von Entscheidungsqualität wurde abgeschlossen und ein Ansatz zur Bewertung von Entscheidungsqualität in Form eines Fragebogenverfahrens wurde entworfen.

HAFF AP2: Erstellung eines Webinars für eine gute Kommunikationskultur; Weiterarbeit am Arbeitsbericht für die Umsetzung einer positiven Sicherheits- und Fehlerkultur innerhalb von TRANSENS (in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut und KIT).

HAFF AP3: Beginn der Integration der Kommunikationskultur in die zehn Schritte des TD Ansatzes und Sammlung von möglichen Anwendungsszenarien.

SAFE AP1: Weiterführung der Bestandsaufnahme der Methoden zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit hinsichtlich ganzheitlicher, systemischer Effekte auf den Umgang mit Sicherheitsanforderungen.

SAFE AP2: Die Analysen des Einflusses der menschlichen Zuverlässigkeit in den Einschätzungen und Bewertungen von Ungewissheiten auf der Basis der BMU Sicherheitsanforderungen wurde abgeschlossen.

SAFE AP3: Mögliche Szenarien zur Demonstration der Bedeutung der Berücksichtigung menschlicher Einflüsse auf die Modellierungsunsicherheit in der geologischen Modellierung als Anwendungsfeld wurden untersucht (in Zusammenarbeit mit TU Clausthal).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

HAFF AP1: Das entwickelte Fragebogenverfahren soll im Rahmen von TRANSENS mit den Projektpartnern eingesetzt und evaluiert werden hinsichtlich seiner Möglichkeiten zur Einschätzung einer Organisation hinsichtlich seiner Entscheidungsqualität.

HAFF AP2: Anwendung des Webinars zu Kommunikationskultur für spezifische Anwendungsszenarien im Rahmen der Endlagersuche (beispielsweise: Bürgerbeteiligung, Präsentation von Forschungsergebnissen, Umgang mit Unsicherheiten und Ungewissheiten).

HAFF AP3: Planung von Workshops zur Integration von Kommunikation mit den zehn Schritten des TD Ansatzes.

SAFE AP1: Weiterführung der Systematik für die Berücksichtigung der menschlichen Zuverlässigkeit beim Umgang mit Sicherheitsanforderungen.

SAFE AP2: Demonstration der Aspekte menschlicher Zuverlässigkeit mithilfe einer Synopse zu den BMU Sicherheitsanforderungen.

SAFE AP3: Bewertung des Einflusses menschlicher Zuverlässigkeit in der geologischen Modellierung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Webinar für gute Kommunikationskultur (zugänglich über das Fachgebiet Arbeit und Organisationspsychologie).

Sträter, O. (2020): Achtsamkeit und Fehlerkultur als notwendige Sicherheitsleistung, Die Bedeutung der Entwicklung einer Hochzuverlässigkeitsgemeinschaft für den sicheren Betrieb eines Endlagers. In: Brohmann, B., Brunnengräber, A. & Hocke-Bergler, P. & Losada, A. M. I. (Hrsg.) Robuste Langzeit-Governance bei der Endlagersuche, Soziotechnische Herausforderungen im Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Transcript (ISBN 978-3-8376-5668-8)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ -, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11850A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2020 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 69.990,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Shao	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Dieses Pilotprojekt konzentriert sich auf die technischen Barrieren für Endlager der nuklearen Abfälle und wird die THMC-Prozesse in Bentonit (GMZ und MX-80) untersuchen. Die Forschungsaktivitäten werden das Modellierungs- und Laborexperiment zu den physikalischen und chemischen Eigenschaften des chinesischen GMZ-Bentonits sein. Der GMZ-Bentonit wurde von dem Projektpartner Beijing Institute of Uranium Geology (BRIUG) bereitgestellt, und wird in zukünftigen chinesischen Endlagern verwendet. Eines der Projektziele ist die Entwicklung und Kalibrierung der numerischen Modelle, mit denen die physikalischen und chemischen Prozesse vom GMZ-Bentonit simuliert werden können. Dies wird auch durch die im Labor gemessenen Parameter unterstützt. Ein weiteres Ziel des Projekts ist, die Verbindungen mit der chinesischen Wissenschaftsgemeinschaft in der Endlagerforschung herzustellen. Die etablierte Kooperationsbeziehung wird künftige gemeinsame Projekte in den kristallinen Gesteinen im Feldmaßstab ermöglichen. Insbesondere möchten die deutsche Wissenschaftler Zugang zu dem neu errichteten unterirdischen Forschungslabor Beishan bekommen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundforschungsprojekt besteht aus folgenden Arbeitspaketen (AP):

- AP1: Projektmanagement
- AP2: Systemanalyse (Modellierung)
  - AP2.1: TH2M-Prozessmodellentwicklung
  - AP2.2: RTM-Modellentwicklung (Reactive Transport Processes)
- AP3: Experimente
- AP4: Synthesis & Education

Das UFZ-Team beschäftigt sich im Berichtszeitraum hauptsächlich mit AP1 und AP2.2.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Zum AP1 Projektmanagement: Mit großer Unterstützung der BGR (Dr. Hua Shao) wurde am 25.11.2020 ein Kick-off Meeting organisiert und erfolgreich abgehalten. Alle sechs deutschen Institute und der chinesische Partner BRIUG haben online an diesem Treffen teilgenommen. Die deutschen Partner präsentierten ihre bisher bestehenden Arbeiten auf dem Gebiet der Endlager- und Bentonit-Forschung. Das BRIUG-Team stellte die folgenden Themen vor: (1) das unterirdische Labor von Beishan, (2) vorhandene Daten des GMZ-Bentonit, und (3) die Forschungsthemen, an denen BRIUG in den nächsten Jahren arbeiten wird.

Während des Kick-off Meetings hat Dr. Thomas Frühwirth von der TU Freiberg nach der Möglichkeit von Granitgesteinsproben aus dem unterirdischen Labor von Beishan gefragt. Der Projektleiter hat separate Treffen mit der TU Freiberg und BRIUG online durchgeführt, um an den technischen Spezifikationen dieser Gesteinsproben zu arbeiten. Die endgültige Bestätigung von BRIUG, ob diese Proben nach Freiberg verschickt werden können, wird frühestens im März erwartet.

Zum AP2.2 RTM-Modellentwicklung: Im Dezember wurde eine Diskussion auf Arbeitsebene mit Kollegen von UFZ und BRIUG online durchgeführt. Die Kollegen vom UFZ haben die aktuelle Modellierungsfunktion des reaktiven Transportprozesses in der OpenGeoSys-Software demonstriert. Die Modellierungsfunktion umfasst Kationenaustausch, Auflösen und Ausfällen von Mineralien sowie die Sorption von Radionukliden. Die Kollegen von BRIUG haben ihr Interesse an der OpenGeoSys-Software bekundet und gefördert, den chemischen Einfluss des Granitporenwassers auf die geochemischen Eigenschaften von GMZ-Bentonit zu simulieren. Während des Treffens tauschten beide Seiten bestehende chemische Parameter der GMZ-Bentonite aus, die bereits in BRIUG gemessen wurden. Da die Abmessungen des Metallkanisters sowie das im Endlager verwendete Material noch nicht von der chinesischen Seite festgelegt wurden, wird das UFZ-Team das numerische Modell für die chemischen Prozesse zuerst in 1D vorläufig erstellen und simulieren.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Es ist geplant, dass das UFZ-Team in der ersten Hälfte des Jahres 2021 das erste reaktive Transportmodell des GMZ-Bentonits erstellen wird. Der Schwerpunkt wird auf dem Einfluss von Granitporenwasser liegen. Das Modell wird schrittweise auf 2D und mit einem gewissen Grad an chemischer Abweichung vom Wirtsgestein erweitert.

Ein junger Wissenschaftler, Herr Chaofan Chen, wird voraussichtlich ab Juli 2021 an diesem Projekt teilnehmen. Dr. Nana Li vom chinesischen Projektpartner BRIUG hat geplant, das UFZ und andere deutsche Institute in der zweiten Hälfte des Jahres 2021 für einen Zeitraum von drei Monaten zu besuchen. Ihr Forschungsaufenthalt in Deutschland wird separat vom chinesischen Stipendienrat (CSC) unterstützt.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11850B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2020 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 25.000,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Czaikowski	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Pilotprojekt ist zur Vorbereitung der internationalen Kooperation mit China im Bereich der Endlagerforschung in einem zukünftigen chinesischen Untertagelabor „URL Beishan“ in Granite. Es werden vier Themenbereiche betrachtet: (1) sozial-technische Aspekte; (2) Modellierung; (3) Laboruntersuchung; und (4) Ausbildung. Das ist ein Verbundprojekt mit zahlreicher deutschen und chinesischen Beteiligungspartnern (BGR, GRS, TUBAF, TUC, UFZ, FSU, KIT; BRIUG, TONGI-U). Der Hauptaufgaben des Pilotprojekts sind Modellierung des China-Mock-Up-Experiments und Vorbereitung der Laboruntersuchung zur Bestimmung der THMC-Eigenschaften von GMZ-Bentonit aus China und MX80-Bentonit aus der USA.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Pilotprojekt wird von allen Partnern in fünf Arbeitspaketen durchgeführt:

AP1: Projektmanagement

AP2: Modellierung der THM-Prozesse im Bentonit im China-Mock-Up-Experiment

AP3: Vorbereitung auf Laboruntersuchung zur Bestimmung THMC-Eigenschaften von Bentoniten GMZ und MX80

AP4: Synthese und Ausbildung

AP5: Sozial-technische Forschung

GRS ist an AP3 beteiligt.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Am 26. Oktober fand das erste Projektgespräch per Internet mit Beteiligung aller deutschen und chinesischen Partnern statt. Dabei hat GRS die Arbeitsplanung vorgestellt. In der Pilotphase des Projekts wird GRS Versuchsverfahren zur Untersuchung der THM-Eigenschaften vom Bentonit GMZ und MX80 entwickeln.

Im letzten Jahr hat der chinesische Partner zwei Materialsorten des GMZ-Bentonits und die zugehörigen Daten für unsere Laboruntersuchungen geliefert. Mit der Hilfe von der BGR wurden die chemischen und mineralogischen Zusammensetzungen der GMZ- und MX80-Bentonite ermittelt. Im GRS-Labor wurde auch das Grundwasser aus dem Granite Beishan, wo das chinesische Untertage Labor bzw. ein zukünftiges Endlager gebaut werden soll, für unsere Laboruntersuchungen nachproduziert.

Zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit von Bentonit ist ein Versuchsverfahren entwickelt worden, wobei die Wassergehalte von Bentonit-Proben bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten bis zum Gleichgewicht gemessen werden. Daraus wird der Wasserrückhalt im Zusammenhang mit relativer Feuchtigkeit (Saugspannung) bestimmt.

Zur Bestimmung von Quelldruck, Wasserpermeabilität und Gastransport wurde ein Versuchssystem mit zehn Ödometerzellen zusammengebaut. Damit können die geotechnischen Eigenschaften der beiden Bentonite GMZ und MX80 unter gleichen Bedingungen ermittelt werden.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Vorversuche zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit von Bentonit GMZ/MX80
- Vorversuche zur Bestimmung von Quelldruck und Wasserpermeabilität von Bentonit GMZ/MX80

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11850C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2020 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 89.993,50 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Nagel	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Pilotprojekt konzentriert sich auf die Funktionalität der technischen Barrieren für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen und wird dabei die entsprechenden THMC-Prozesse in Bentoniten (GMZ und MX-80) untersuchen. Die Forschungsaktivitäten innerhalb des ersten Jahres werden sich hauptsächlich mit Modellierungsarbeiten befassen, um das grundlegende Verständnis für den Langzeitverschluss in verschiedenen Endlagertypen weiter zu verbessern. Die wichtigsten Ergebnisse werden mit Hilfe moderner Kommunikationsmethoden (VR) synthetisiert. Der Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten innerhalb der Pilotphase ist dem BRIUG THM Mock-up Test zur Eignung von GMZ-Bentonit als geotechnische Dichtung für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle gewidmet.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Pilotprojekt wird sich zunächst auf ausgewählte experimentelle Untersuchungen und numerische Modellierung des chinesischen Mock-up-Tests konzentrieren, insbesondere mit der Untersuchung von THM-Prozessen in verschiedenen Bentonit-Barriersystemen. Die Projektaktivitäten sind in fünf Arbeitspakete gegliedert. Die Hauptteile (WP2 Systemanalyse und WP3 Experimente) sind der kombinierten Modellierung und experimentelle Arbeiten an GMZ- und MX-80-Bentoniten gewidmet.

In diesem Teilvorhaben werden vorrangig Beiträge zur THM Modellierung des China Mock-Up Versuches in WP2 geliefert. Darüber hinaus werden begleitende experimentelle, gesteinsphysikalische Arbeiten an Beishan Granit durchgeführt. Diese dienen als Start- und Anknüpfungspunkte für das Verbundprojekt, das an das Pilotprojekt anschließen wird, und auf THM/C – gekoppelte Prozesse im kristallinen Wirtsgestein fokussiert ist.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen der virtuellen Kick-off Veranstaltung wurden die ersten Arbeitspakete diskutiert und konkretisiert. Alle Projektpartner von deutscher und chinesischer Seite haben an diesem Treffen teilgenommen und den Stand ihrer jeweiligen Vorarbeiten vorgestellt. Hauptaspekte aus Sicht der THM Modellierung waren die Festlegung des zu modellierenden Bentonittyps sowie dessen Eigenschaften (Modellparametrisierung) und Absprachen zum Austausch von Probenmaterial.

Die folgenden Arbeiten wurden im Berichtszeitraum durchgeführt:

- Geometrieerstellung und -vernetzung des China-Mock-Up Experiments in OpenGeoSys. Es wurde zur Vereinfachung der vorläufigen Modellentwicklung eine axialsymmetrische Repräsentation gewählt.
- Weiterentwicklung zweier Prozessklassen für nichtisothermen Zweiphasenfluss in deformierbaren porösen Medien in OpenGeoSys, von denen eine auf einer vollständigen Zweiphasenformulierung, die andere auf einer Richards Approximation beruht.
- Erweitern und Testen sättigungsabhängiger Quellmodelle in OpenGeoSys für die Berechnung von Quellspannungen im China-Mock-Up Experiment.
- Erste Vorberechnungen des Versuchs zum Überprüfen der Randbedingungen.

Die im Projektantrag vorgesehene Entnahme von Probematerial in Beishan ist aufgrund der Reisebeschränkungen in Zusammenhang mit der COVID-19 Pandemie zurzeit nicht möglich. Daher wurde im Rahmen des virtuellen Kick-Off Meetings der Kontakt zu den für das Probematerial verantwortlichen chinesischen Kollegen der BRIUG geknüpft. Diese haben ihre prinzipielle Unterstützung bei der Entnahme und dem Transport von Bohrkernproben von China nach Deutschland signalisiert. Der Bedarf an Probenmaterial aller am Pilotprojekt beteiligten (deutschen) Partner wurde erhoben sowie deren jeweilige Untersuchungsziele und dazu eingesetzten experimentellen Methoden zusammengestellt. Diese Bedarfsmeldung wird gegenwärtig mit den chinesischen Kollegen diskutiert und mit ihnen mit dem Ziel abgestimmt, Probematerial der benötigten Qualität und Quantität nach Deutschland transportieren zu können.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Folgende Arbeitsschritte sind für den folgenden Berichtszeitraum geplant:

- Detaillierte Simulation des Aufsättigungsverhaltens während des China-Mock-Up Experiments im axialsymmetrischen Modell unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Effekte durch die zentrale Wärmequelle.
- Präzisierung der Randbedingungen im Austausch mit den chinesischen Partnern, um Lücken und Widersprüche in der publizierten Literatur zum Experiment zu schließen.
- Vergleich der zu verwendenden Modellformulierungen an klar definierten Benchmarks mit direkter Relevanz für den zu simulierenden Versuch, insbesondere zum a) Quellverhalten und b) Heat-Pipe Effekt. Diese Benchmarks vereinfachen den Austausch mit anderen Modellierteams.
- Sensitivitätsanalysen am THM Modell sowie Testen alternativer Konstitutivansätze.
- Die Planung der experimentellen Arbeiten an Beishan Granit wird zunächst fortgesetzt und nach dem Vorliegen der Bohrkernproben in Abhängigkeit der tatsächlich erhaltenen Probenqualitäten konkretisiert. Das Ziel der gesteinsphysikalischen, -mechanischen und geochemischen Versuche ist die Schaffung einer ersten Datenbasis grundlegender Gesteinsparameter sowie Benchmarks für numerische Untersuchungen im nachfolgenden Verbundprojekt.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Die bisherigen Arbeiten sind in internen Berichten für die Modelldokumentation zusammengefasst. Eine Veröffentlichung ist in den folgenden Berichtszeiträumen geplant.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolph-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11850D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2020 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 70.072,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Düsterloh	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Übergeordnetes Ziel des Verbundforschungsvorhabens ist es, geotechnische Fragestellungen zur Funktionalität von Abdichtungselementen aus Bentonit für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einer längerfristigen, vertieften, nachhaltigen und strukturierten Kooperation zwischen Deutschland und China zu bearbeiten. Neben wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich laborativer, feldbezogener und numerischer Untersuchungen, sollen durch die Entwicklung und Installation eines Ausbildungs- und Traineeprogrammes Kompetenzen und Erfahrungen im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle ausgetauscht werden. Schwerpunkte des hier vom Projektpartner TUC beantragten Pilotprojektes sind (a) numerisch-rechnerische Reanalysen des THM Mock-up Tests von BRIUG mit dem Ziel aufzuzeigen, ob und inwieweit unter Berücksichtigung der im Versuch realisierten THMC-Einwirkungen die dokumentierten Messwerte abgebildet und nachvollzogen werden können und (b) laborative Untersuchungen zur Bestimmung der 2-Phasenfluss-Eigenschaften von Bentonit durchzuführen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- WP1: Projektmanagement (TUBAF und UFZ)
- WP2: Numerische Reanalyse des BRIUG THM Mock-up Tests
- WP3: Laborative Untersuchungen zum 2-Phasenfluss-Verhalten von Bentonit
- WP4: Projektbezogenes Fortbildungs- und Traineeprogramm für wiss. Mitarbeiter und Studenten
- WP5: Schlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### WP2:

Durchführung und Auswertung von numerischen Simulationen zum am BRIUG durchgeführten Mock-up Test an GMZ-Bentonit mit dem am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelten FTK-Simulator (FTK = FLAC<sup>3D</sup>-TOUGH2-Kopplung) unter Berücksichtigung von T-, TH<sup>2</sup>- bzw. TH<sup>2M</sup>-Prozessen.

Verifikation und Validation des in den FTK-Simulator implementierten Barcelona-Basic-Modells (BBM) durch Vergleich der mit dem FTK-Simulator erhaltenen Simulationsergebnisse und der mit dem am BRIUG eingesetzten Simulator LAGAMIN erhaltenen Simulationsergebnisse sowie den Laborergebnissen des BRIUG.

Die mit dem FTK-Simulator erhaltenen numerischen Ergebnisse (z. B. Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sättigungsgrad, Saugspannung) passen sehr gut zu Simulations- und Laborergebnissen des BRIUG.

#### WP3:

Literaturrecherche zur Bestimmung geeigneter laborativer Messmethoden für die Ermittlung der Einphasenfluss- und Zweiphasenflusseigenschaften von Bentonit (z. B. Permeabilität, Kapillardruck-Sättigungsgrad-Beziehung, Beziehung zwischen Relativpermeabilitäten und Sättigungsgrad).

Erste Kontrolle der Funktionalität der konstruierten Laborversuchsanlage zur Messung von Zweiphasenflusseigenschaften von Bentonit anhand der Durchführung und Auswertung von Test-Laborversuchen an höher-permeablen Dummy-Prüfkörpern zur Messung ihrer Permeabilität unter Zweiphasenflussbedingungen bei alternativer oder gleichzeitiger Durchströmung mit Stickstoff und/oder Wasser.

Untersuchung des Einflusses des Klinkenberg-Effekts auf die Versuchsergebnisse an höher-permeablen Dummy-Prüfkörpern.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

#### WP2:

Durchführung von numerischen Simulationen zur weiteren Verifikation der Implementierung des Barcelona-Basic-Modells (BBM) in den FTK-Simulator anhand eines Vergleichs der erhaltenen Simulationsergebnisse mit einer vom LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) veröffentlichten numerischen Simulation zur Implementierung des Barcelona-Basic-Modells (BBM) in Simulator TOUGH-FLAC.

#### WP3:

Fortführung der Test-Laborversuche an höher-permeablen Dummy-Prüfkörpern zur vertieften Kontrolle der Funktionalität der konstruierten Laborversuchsanlage zur Messung von Zweiphasenflusseigenschaften von Bentonit.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben1, 07743 Jena		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11850E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2020 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 15.104,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schäfer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ein wesentlicher Bestandteil des Multi-Barriere-Systems für die tiefgeologische Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen ist die geotechnische Barriere (Bentonit). Im Rahmen des chinesisch-deutschen Pilotprojekts sind Voruntersuchungen zu THMC Prozessen geplant, insbesondere in Bezug auf GMZ-Bentonit im Vergleich zu bereits vorhandenen Daten zu MX-80 Bentonit. Zwei Aspekte werden von FSU in enger Kooperation mit KIT-INE hauptsächlich untersucht:

- Die Rolle von akzessorischen Gemengteilen neben Montmorillonit auf das Erosionsverhalten (Barriere-Integrität) und
- die Wechselwirkung von korrodierenden Kanister-Materialien mit dem GMZ-Bentonit.

Basierend auf den beiden Hauptthemen dieser Pilotstudie ist der folgende Arbeitsplan vorgesehen: Charakterisierung und Quantifizierung der akzessorischen Mineralien in GMZ-Bentonit (Mineralogie, Korngrößenverteilung, Reaktivität) und Erosionsexperimente unter glazialen Schmelzwasserbedingungen und Kanister-Korrosionsmaterialanalyse in Präsenz von GMZ-Bentonit. Die Einrichtung der ersten reaktiven Modelle, insbesondere für HMC-Prozesse wird parallel geplant. Beide Aktivitäten sollen in enger Zusammenarbeit mit den chinesischen Forschungsgruppen durchgeführt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Projekt Management
- AP2: System Analyse (Modellierung)
  - AP2.1: TH<sup>2</sup>M Prozesse
  - AP2.2: Reaktive Transport Prozesse
- AP3: Experimente
  - AP3.1: TH<sup>2</sup>M Prozesse
  - AP3.2: Reaktive Transport Prozesse
- AP4: Synthese & Ausbildung
  - AP4.1: Virtuelles URL Konzept
  - AP4.2: Ausbildungs- und Workshop Programm

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2.2: Die bisher durchgeführten und weiterhin geplanten Aktivitäten fokussieren sich auf theoretische Arbeiten. Das Manuskript Huber et al. (2021, in review) der Partner KIT-INE und FSU wurde nach Revision wieder eingereicht.
- AP3.2: Zur Koordination der Arbeiten innerhalb des Projektes wurde am 26.10.2020 ein erstes online-kick-off Meeting veranstaltet und die Verteilung von Probematerial (GMZ-Bentonit und Bohrkernmaterial aus Beishan, China) vereinbart. Für das FSU Projekt und die Kooperation mit KIT-INE ist GMZ- Bentonitmaterial von Seiten GRS zur Verfügung gestellt worden, es handelt sich um folgende Chargen:
- GMZ24-200, 0.5 kg (abgepackt am 27.10.2020, BS)
  - GMZ24-200, 1.5 kg (abgepackt am 27.10.2020, BS)
  - GMZ-001, 0.5 kg (keine weiteren Angaben)
  - GMZ-001, 1.5 kg (abgepackt am 27.10.2020, BS)
- Die Materialien sind für die Pilotstudien von FSU und KIT-INE gedacht und werden zwischen den Partner für die geplanten Untersuchungen verteilt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Auf Grund der Schließung der Laborbereiche im Zuge der Corona-Pandemie sind einige der geplanten präparativen Vor-Arbeiten nicht durchgeführt worden.

- AP2.2: Fortführung der theoretischen Arbeiten und speziell Publikation des Manuskripts Huber et al. (2021, in review).
- AP3.2: Das experimentelle Setup zur Quantifizierung der Bentoniterosion unter glazialen Schmelzwasserbedingungen und dem Einfluss von akzessorischen Gemengteilen wird im Moment mit MX-80 Rohmaterial und Mischungen aus aufgereinigten Na-homöionischen MX-80 Proben (nahezu reiner Montmorillonit) und Zumischung reiner Quarzmehlanteile (10 Gew. %, 20 Gew. %) untersucht (Projekt KOLLORADO-e3). Diese Arbeiten sind experimentell nahezu abgeschlossen. Im Anschluss werden unter identen Versuchsbedingungen Experimente zu den beiden Chargen des GMZ Materials ohne Aufbereitung durchgeführt.  
Parallel hierzu erfolgt eine Aufreinigung der GMZ Proben und Separation des Tonmineralanteils.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Huber, F. M., D. Leone, M. Trumm, L. Moreno, I. Neretnieks, A. Wenka, T. Schäfer (2021): Impact of fracture geometry on bentonite erosion - a numerical study, Int. J Rock Mech. Min.; in review

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11850F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2020 bis 28.02.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 10.270,50 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Geckeis	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ein wesentlicher Bestandteil des Multi-Barriere-Systems für die tiefgeologische Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen ist die geotechnische Barriere (Bentonit). Im Rahmen des chinesisch-deutschen Pilotprojekts sind Voruntersuchungen zu THMC Prozessen geplant, insbesondere in Bezug auf GMZ-Bentonit im Vergleich zu bereits vorhandenen Daten zu MX-80 Bentonit. Zwei Aspekte werden von KIT-INE in enger Kooperation mit FSU hauptsächlich untersucht:

- Die Rolle von akzessorischen Gemengeteilen neben Montmorillonit auf das Erosionsverhalten (Barriere-Integrität) und
- Die Wechselwirkung von korrodierenden Kanister-Materialien mit dem GMZ-Bentonit.

Basierend auf den beiden Hauptthemen dieser Pilotstudie ist der folgende Arbeitsplan vorgesehen: Charakterisierung und Quantifizierung der akzessorischen Mineralien in GMZ-Bentonit (Mineralogie, Korngrößenverteilung, Reaktivität) und Erosionsexperimente unter glazialen Schmelzwasserbedingungen und Kanister-Korrosionsmaterialanalyse in Präsenz von GMZ-Bentonit. Die Einrichtung der ersten reaktiven Modelle, insbesondere für HMC-Prozesse wird parallel geplant. Beide Aktivitäten sollen in enger Zusammenarbeit mit den chinesischen Forschungsgruppen durchgeführt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Projekt Management
- AP2: System Analyse (Modellierung)
  - AP2.1: TH<sup>2</sup>M Prozesse
  - AP2.2: Reaktive Transport Prozesse
- AP3: Experimente
  - AP3.1: TH<sup>2</sup>M Prozesse
  - AP3.2: Reaktive Transport Prozesse
- AP4: Synthese & Ausbildung
  - AP4.1: Virtuelles URL Konzept
  - AP4.2: Ausbildungs- und Workshop Programm

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2.2: Die bisher durchgeführten und weiterhin geplanten Aktivitäten fokussieren sich auf theoretische Arbeiten. Das Manuskript Huber et al. (2021, in review) der Partner KIT-INE und FSU wurde nach Revision wieder eingereicht.

AP3.2: Zur Koordination der Arbeiten innerhalb des Projektes wurde am 26.10.2020 ein erstes online-kick-off Meeting veranstaltet und die Verteilung von Probematerial (GMZ-Bentonit und Bohrkernmaterial aus Beishan, China) vereinbart. Für das FSU Projekt und die Kooperation mit KIT-INE ist GMZ- Bentonitmaterial von Seiten GRS zur Verfügung gestellt worden, es handelt sich um folgende Chargen:

- GMZ24-200, 0.5 kg (abgepackt am 27.10.2020, BS)
- GMZ24-200, 1.5 kg (abgepackt am 27.10.2020, BS)
- GMZ-001, 0.5 kg (keine weiteren Angaben)
- GMZ-001, 1.5 kg (abgepackt am 27.10.2020, BS)

Die Materialien sind für die Pilotstudien von FSU und KIT-INE gedacht und werden zwischen den Partner für die geplanten Untersuchungen verteilt.

Für die Untersuchungen im KIT vorgesehene Proben werden derzeit für den Versand vorbereitet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Auf Grund der Schließung der Laborbereiche im Zuge der Corona-Pandemie sind einige der geplanten präparativen Vor-Arbeiten nicht durchgeführt worden.

AP2.2: Fortführung der theoretischen Arbeiten und speziell Publikation des Manuskripts Huber et al. (2021, in review).

AP3.2: Ein experimenteller Aufbau für Untersuchungen, die die Wechselwirkung eines korrodierenden Behälters mit MX-80 Bentonit simulieren sollen, wurde in den KIT-INE Labors im Rahmen des iCROSS Vorhabens realisiert. Im Laufe des Jahres sind entsprechende Experimente mit GMZ Bentonit (nach sorgfältiger Charakterisierung) geplant. Ziel ist es, den Einfluss von Korrosionsprodukten und Tonalterationsphasen auf die Radionuklidmigration zu quantifizieren. Dazu werden die in KIT-INE und FSU vorhandenen komplementären Untersuchungsmethoden (z. B. KIT-INE:  $\mu$ -XAS, FSU: XRM) Einsatz finden. Die Ergebnisse der Experimente werden mit den Laboruntersuchungen (iCROSS) und den URL Experimenten (MACOTE) an MX-80 verglichen und ggfs. Besonderheiten im Verhalten des GMZ Materials herausgestellt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Huber, F. M., D. Leone, M. Trumm, L. Moreno, I. Neretnieks, A. Wenka, T. Schäfer (2021): Impact of fracture geometry on bentonite erosion - a numerical study, Int. J Rock Mech. Min.; in review

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstr. 21, 55122 Mainz		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11860A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 415.075,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Reich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Thema des Forschungsvorhabens ist die Rückhaltung von Actiniden im Nahfeld eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in Tonsteinformationen Norddeutschlands gemäß dem Standortmodell NORD. Für den Sicherheitsnachweis eines solchen Endlagers gibt es Wissenslücken zum Einfluss von gelöstem Eisen, das bei der Korrosion der Einlagerungsbehälter freigesetzt wird sowie von organischen Liganden, die aus der Beton- bzw. Zementkorrosion der technischen Barriere resultieren. Eine Besonderheit des Standortmodells NORD besteht in der mittleren bis hohen Ionenstärke der Formationswässer des Tongesteins. Deshalb wird der Einfluss von Eisen sowie der organischen Liganden auf die Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen unter hyperalkalinen Bedingungen bei mittleren bis hohen Ionenstärken quantifiziert werden. Dazu werden die Prozesse Sorption, Diffusion, Komplexierung und Redoxtransformation mit experimentellen Methoden studiert, auf molekularer Ebene aufgeklärt und mit thermodynamischen Modellen beschrieben. Auf der Basis der in diesem Projekt und dem vorhergehenden Verbundvorhaben GRaZ I erzielten Ergebnisse soll kritisch bewertet werden, in wieweit vorhandene Befunde für Systeme niedriger Ionenstärke auf die Bedingungen mittlerer bis hoher Ionenstärke gemäß dem Standortmodell NORD anwendbar sind. Dazu werden auch die im Rahmen des europäischen Projektes CORI erzielten Ergebnisse herangezogen. Im Rahmen des Verbundprojekts wird schwerpunktmäßig mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, dem Karlsruher Institut für Technologie, der Universität des Saarlandes, der Universität Potsdam und der TU München zusammengearbeitet.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Einflusses von Fe(II) auf die Rückhaltung von Actiniden an Zementphasen bei mittleren bis hohen Ionenstärken
- Einflusses von niedermolekularen organischen Liganden auf die Rückhaltung von Actiniden an Zementphasen bei mittleren bis hohen Ionenstärken
- Komplexierung von Actiniden mit ausgewählten organischen Referenzliganden

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Komplexierung von EDTA mit  $1,0 \times 10^{-7}$  M Th(IV) wurde mittels CE-ICP-MS bei einer Ionenstärke von 0,15 M und 25 °C untersucht. Die Messungen erfolgten bei pH 1,43 unter Variation der EDTA-Gesamtkonzentration von  $1 \times 10^{-8}$  bis  $7,5 \times 10^{-6}$  M.

Unter der Annahme, dass sich unter diesen Bedingungen nur der neutrale [ThEDTA]-Komplex bildet, wurde für diese Spezies eine Komplexbildungskonstante von  $\log\beta = 22,17 \pm 0,15$  und bei unendlicher Verdünnung  $\log\beta^0 = 25,98 \pm 0,15$  erhalten.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Batchexperimente zur Sorption von Pu(IV) und dem redoxstabilen Analogon Th(IV) an Zementstein in Gegenwart von gelöstem Fe(II) unter hyperalkalinen und anaeroben Bedingungen in synthetischem Zementporenwasser auf Basis der verdünnten Gipshutlösung (ACW-VGL)
- Untersuchung des Einflusses von Gluconat auf die Rückhaltung von Pu(IV) und dem Analogon Th(IV) an Zementstein (analog zu den Versuchen zum Einfluss von Fe(II))
- Vorbereitung der Versuche zur Diffusion von Pu(IV) in Zementstein mit ACW-VGL unter anaeroben Bedingungen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11860B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 426.606,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Schmeide	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Schwerpunktmäßig soll der Einfluss von Eisen sowie von organischen Liganden auf die Freisetzung bzw. Rückhaltung endlagerrelevanter Radionuklide (U, Cm, Pu) in Systemen mit Zementphasen, Tonmineralphasen und Ca-Bentonit als Puffermaterial in hyperalkalinen Medien mittlerer bis hoher Ionenstärke untersucht werden. Hierfür werden Batch-Sorptionsexperimente und spektroskopische Methoden kombiniert. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen niedere Oxidationsstufen der Radionuklide. Dabei soll der Einfluss von Fe(II) bzw. von Fe(III) bezüglich konkurrierender Effekte auf die Rückhaltung bzw. Komplexierung von Actiniden identifiziert werden. Weiterhin soll der Einfluss von Fe(II) auf die Redoxstabilität von Actiniden in höheren Oxidationsstufen speziell für U und Pu untersucht werden. Die Stabilität Actinid-dotierter Phasen in komplex zusammengesetzten Lösungen erhöhter Ionenstärke wird untersucht. Spektroskopische Untersuchungen der binären Uran(VI,IV)-Ligand-Systeme werden durchgeführt, um molekulare Strukturen und Komplexbildungskonstanten im zementrelevanten pH-Bereich zu ermitteln. Die geplanten Batchsorptions- und Komplexierungsexperimente in Kombination mit sich jeweils ergänzenden spektroskopischen Methoden liefern komplementäre Informationen (sowohl zu chemischen Alterationsprozessen als auch zu strukturellen Veränderungen), die zu einem detaillierten mechanistischen Verständnis der Radionuklid-Immobilisierung unter Endlagerbedingungen beitragen. Das Forschungsvorhaben erfolgt in Kooperation mit den Förderprojekten der Universitäten Mainz, Dresden, Saarbrücken, München, Heidelberg, Potsdam und des Karlsruher Instituts für Technologie.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Uran-Rückhaltung an C-S-H-Phasen unter reduzierenden Bedingungen – Einfluss niedermolekularer organischer Liganden
- Curium(III)-Rückhaltung an C-(A-)S-H-Phasen – Einfluss von Fe(III)
- Plutonium-Rückhaltung an C-(A-)S-H-Phasen – Einfluss von Fe(II), Fe(III)
- Uran-Rückhaltung an Ca-Bentonit unter reduzierenden Bedingungen – Einfluss niedermolekularer organischer Liganden
- Plutonium-Rückhaltung an Ca-Bentonit unter reduzierenden Bedingungen – Einfluss von Fe(II)
- Uran(VI)- und Uran(IV)-Komplexierung mit kleinen organischen Molekülen
- Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung
- Transfer der Erkenntnisse und Integration der Ergebnisse für den Sicherheitsnachweis

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die spektroskopischen Untersuchungen bezüglich des Uranyl(VI)–Citrat-Systems (U(VI)–Cit) wurden im pH-Bereich 2–10 weitergeführt. Die experimentellen Befunde wurden außerdem durch vielfältige quantenchemische Berechnungen (auf dem Level der Dichtefunktionaltheorie, DFT) untermauert. Es konnte erstmalig gezeigt werden, dass in wässriger Lösung oberhalb einer bestimmten Uran- und Citrat-Konzentration zwei Moleküle der 3:3-Spezies einen sogenannten Sandwich-Komplex bilden, der Metall-Ionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  bzw.  $\text{La}^{3+}$ ) einschließt. Diese Ergebnisse vertiefen und erweitern das Verständnis der aquatischen Chemie von Uran(VI) im Allgemeinen, und innerhalb des Uranyl(VI)–Citrat-Systems im Besonderen.

Es wurden weitere Batch-Sorptionsuntersuchungen sowie zeitaufgelöste Lumineszenzmessungen zum Einfluss von  $\text{Ca}^{2+}$  auf die U(VI)-Rückhaltung an Tonmineralen bei hohen pH-Werten durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Umfassende Bewertung der U(VI)-Retention an Tonmineralen und C-A-S-H-Phasen bei erhöhten Ionenstärken.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Kretzschmar, J., Tsushima, S., Drobot, B., Steudtner, R., Schmeide, K., Stumpf, T.: Trimeric uranyl(VI)–citrate forms  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , and  $\text{La}^{3+}$  sandwich complexes in aqueous solution. *Chem. Commun.* 56, 13133-13136 (2020)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11860C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 411.017,50 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Altmaier	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Thema des Forschungsvorhabens ist die Rückhaltung von Radionukliden (Actiniden) im Nahfeld eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in Tonsteinformationen Norddeutschlands gemäß dem Standortmodell NORD. Für den Sicherheitsnachweis eines solchen Endlagers gibt es Wissenslücken, etwa zum Einfluss von organischen und silicatischen Liganden, die aus der Beton- bzw. Zementkorrosion der technischen Barriere resultieren können. Der Einfluss der organischen und silicatischen Liganden auf die Radionuklidrückhaltung soll an Zementkorrosionsphasen und dem Bentonitpuffer unter hyperalkalinen Bedingungen insbesondere bei mittleren bis hohen Ionenstärken quantifiziert werden. Dazu werden die Prozesse Sorption, Komplexierung, Redoxtransformation und Löslichkeit mit experimentellen und ggf. quantenchemischen Methoden studiert, auf molekularer Ebene aufgeklärt und mit thermodynamischen Modellen beschrieben. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse soll kritisch bewertet werden, in wieweit vorhandene Befunde für Systeme niedriger Ionenstärke auf die Bedingungen mittlerer bis hoher Ionenstärke gemäß dem Standortmodell NORD anwendbar sind.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Arbeiten von KIT-INE im Rahmen von GRaZ II gliedern sich in folgende Arbeitspakete:

- AP1: Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen und Bentonit unter hyperalkalinen Bedingungen bei mittleren bis hohen Ionenstärken.
- AP2: Wechselwirkung von Actiniden mit organischen und silicatischen Liganden.
- AP3: Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung.
- AP4: Transfer der Erkenntnisse und Integration der Ergebnisse für den Sicherheitsnachweis.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im ersten, nur dreimonatigen, Berichtszeitraum wurden von KIT-INE in GRaZ II die folgenden Arbeiten durchgeführt, die im Wesentlichen auf die Suche nach geeigneten Bewerber/innen für die beiden Doktorandenstellen fokussierten. Die beiden Doktorarbeiten sollen in den Arbeitspaketen AP1 (AP1.1 - 1.4) und AP2 (AP2.1 + 2.3) durchgeführt werden.

- AP1: Die Doktorandenstelle in AP1 konnte erfolgreich besetzt werden. Frau Aline Thumm wird die Stelle zum 01.02.2021 antreten. Der Titel der Arbeit lautet „Sorption von An(III) und An(IV) an Zementphasen und Bentonit: Einfluss kompetitiver Liganden und kinetischer Effekte“. Ein Arbeitsplan wurde erstellt, unter Berücksichtigung der aktuellen Corona-Maßnahmen am KIT-INE. Da Frau Thumm bereits ihr Masterstudium am INE durchgeführt hatte, verfügt sie über Erfahrungen im Umgang mit offenen Radionukliden und in der Handhabung unterschiedlicher analytischer Methoden des KIT-INE.
- AP2: Die Doktorandenstelle in AP2 konnte aufgrund mangelnder geeigneter Bewerber/innen im Berichtszeitraum noch nicht besetzt werden.
- AP3: Es erfolgten im Berichtszeitraum keine spezifischen Aktivitäten zur Nachwuchsförderung.
- AP4: Es sind keine Aktivitäten in frühen Projektphasen geplant.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Bedingt durch die aktuellen Corona-Maßnahmen, müssen die Arbeiten von Frau Thumm zumindest in den ersten Wochen der Doktorarbeit teilweise im Homeoffice erfolgen. Der Fokus liegt hier auf einer detaillierten Literaturrecherche und -zusammenfassung der zu bearbeitenden Themengebiete, und auf der Einarbeitung in verschiedene geochemische Modellierungsprogramme, welche für die Arbeit notwendig sind (z. B. PhreeQC). Zudem werden die experimentellen Arbeiten im Kontrollbereich des KIT-INE begonnen und die notwendigen Materialien bestellt. Im Labor werden CSH-Phasen synthetisiert und mit verschiedenen Methoden charakterisiert, und erste Probenansätze zur Wechselwirkung von Radionukliden mit den Festphasen generiert.
- AP2: Die Suche nach geeigneten Bewerber/innen für die Doktorandenstelle in AP2 wird weitergeführt.
- AP3: Es sind Kurzvorträge und Vorstellungen der im Projekt beteiligten Nachwuchswissenschaftler/innen im Rahmen eines für Februar 2021 geplanten Videomeetings geplant.
- AP4: Es sind keine Aktivitäten in frühen Projektphasen geplant.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11860E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 523.530,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Sieber	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

- Quantenmechanische Modellierung der Sorption von Actinoiden und Eisen an C-S-H-Phasen
- Quantenmechanische Modellierung der Komplexierung von Actinoiden in basischen Lösungen

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm umfasst folgende Arbeitspakete (AP):

- AP1: Sorption an C-S-H-Phasen  
 AP2: Komplexierung von Actinoiden  
 AP3: Unterstützung spektroskopischer Experimente

AP1 umfasst periodische Modelle von C-S-H-Festkörpern und -Oberflächen und die Untersuchungen der Wechselwirkung von Actinoiden mit diesen. Weiterhin wird die Sorption von Eisen und ihre Konkurrenz mit Actinoiden untersucht.

In AP2 werden Silikatkomplexe sowie Komplexe mit Lösungskationen der Actinoiden in wässriger Lösung untersucht.

AP3 ist der Unterstützung der Interpretation spektroskopischer Experimente im Verbund durch entsprechende quantenmechanische Modellierungen im Bedarfsfall gewidmet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.1: Modelle; AP1.3: Sorption an (001)-Oberfläche; AP1.5: Sorption und Konkurrenz Eisen; AP2.3: Ternäre Komplexe mit Lösungskationen.

Methodische Arbeiten zur Verbesserung von Tobermoritmodellen von C-S-H-Phasen (AP1.1) wurden mit der Untersuchung des Austauschs von Protonen gegen  $\text{Na}^+$  bei niedrigen C/S-Werten aufgenommen.

Als Beitrag zur Aufklärung des Sorptionsmechanismus von Actinoiden an C-S-H-Phasen wird die Adsorption von U(IV) an der (001)-Oberfläche von Tobermoritmodellen (AP1.3) mit C/S-Werten von 0.67 und 1.00 untersucht. Vorläufige Ergebnisse zu drei Adsorptionsplätzen auf einem Substratmodell mit C/S = 0.67 ergaben sorbierte Spezies mit 2-3 OH-Liganden und Koordinationszahlen (CN) von 6 und 7. Die Sorption ist etwas stärker als für U(VI) auf der gleichen Oberfläche. Mittlere U-O-Bindungslängen für CN = 6 stimmen gut mit Messungen zu anderen An(IV) überein, die jedoch eine CN von 8 nahelegen. Zahlen der U-Si- und U-Ca-Abstände liegen unter gemessenen Werten für andere An(IV)-Systeme, was gegen eine Sorption an Oberflächen spricht. Diese Arbeiten werden derzeit auf weitere Sorptionsplätze und eventuell auch C/S-Verhältnisse ausgedehnt.

Die Sorption von Eisen in C-S-H-Phasen (AP1.5) wird derzeit an einem Tobermoritmodell mit C/S = 0.67 untersucht. Dabei werden zwei Protonen durch ein Fe(II)-Ion substituiert. Vorläufige Ergebnisse zeigen sowohl sorbiertes  $\text{Fe}^{2+}$  als auch  $\text{FeOH}^+$  mit der niedrigen Koordinationszahl 4. Bisher konnten drei Sorptionsplätze gefunden werden, einer zwischen den Tobermoritschichten, einer an einer  $\text{SiO}_4$ -Kante sowie einer zwischen den Silikatketten einer Schicht. Es werden derzeit weitere Sorptionsplätze gesucht und Sorptionsenergien zum Vergleich mit Actinoiden bestimmt.

Rechnungen zu ternären Actinoidenkomplexen  $[\text{M}_n\text{Am}(\text{OH})_m]^{3+2n-m}$  (AP2.3),  $(m,n) = (1,2), (1,3), (2,4)$  und  $(3,6)$ ,  $M = \text{Ca}, \text{Mg}$ , die bei erhöhter Salinität und hohem pH relevant sind, wurden um eine explizite Solvatisierung der koordinierten Kationen M sowie eine Überprüfung möglicher Koordinationszahlen der Metallionen ergänzt. Für Ca wurde dabei eine CN von 6 und für Mg von 5 als bevorzugt gefunden. Der Einfluss der expliziten Solvataion erwies sich wie erwartet für Mg als wesentlich wichtiger als für Ca. Aufgrund der stärkeren Bindung von Mg sind alle Komplexe für Mg etwas kompakter und zeigen etwas kürzere Metall-Metall-Abstände. Während absolute Bildungsenergien der Komplexe überschätzt werden, stimmen relative Komplexbildungsenergien für die Reihe der Komplexe  $[\text{Ca}_n\text{Am}(\text{OH})_m]^{3+2n-m}$  gut mit Daten des Projektpartners Karlsruhe für entsprechende Komplexe von Nd(III) und Cm(III) überein. Während einfache Komplexmodelle ohne explizite Solvataion die Bildung von Mg-Komplexen als exothermer beschreiben als für Ca, zeigen um diese Solvataion erweiterte Komplexmodelle, dass Mg schwächer komplexiert als Ca. Dieses Ergebnis unterstreicht die Notwendigkeit einer genaueren Modellierung von Solvataionseffekten für kleine kationische Zentren in derartigen Komplexen. Die hier gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen sollen auf weitere Spezies der Klasse M-An(OH,CO<sub>3</sub>) mit Lösungskationen angewandt werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1.1: Modelle; AP1.3: Sorption an (001)-Oberfläche; AP1.5: Sorption und Konkurrenz Eisen; AP2.3: Ternäre Komplexe mit Lösungskationen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11860F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 482.418,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kumke	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

An der Universität Potsdam (Physikalische Chemie) werden besonders Laser-basierte optische Methoden zur Untersuchung der in den Verbund-Arbeitspakete AP1 und AP2 definierten Fragestellungen eingesetzt und (weiter)entwickelt. Die methodischen Entwicklungen analytischer, optischer Methoden und die systematischen Untersuchungen haben die Verbesserung des molekularen Prozessverständnisses der Wechselwirkungen von Actinoid-Ionen (bzw. Lanthanoid-Ionen als Analoga) mit Zementalterationsphasen oder Bentonit unter hyperalkalinen Bedingungen (AP1) sowie silicatischen Ligandensystemen (AP2) zum Ziel. Das Vorhaben wird in dem Verbundprojekt gemeinsam mit der Universität Mainz, dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, dem Karlsruher Institut für Technologie, der Universität des Saarlandes, der TU München, der TU Dresden sowie der Universität Heidelberg durchgeführt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

In dem Verbundprojekt wird die Rückhaltung von Radionukliden an Zementalterationsphasen und Bentonit unter geochemischen Bedingungen, die für die Tonformationen in Norddeutschland relevant sind (Standortmodell NORD), untersucht.

Das Verbundprojekt enthält vier Arbeitspakete (AP):

- AP1: Radionuklid-Rückhaltung an Zementalterationsphasen und Bentonit unter hyperalkalinen Bedingungen bei mittleren bis hohen Ionenstärken
- AP2: Wechselwirkung von Actiniden mit organischen und silicatischen Ligandensystemen
- AP3: Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung
- AP4: Transfer der Erkenntnisse und Integration der Ergebnisse für den Sicherheitsnachweis

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In AP1 wurden mit der Herstellung der ersten CSH-Templatphasen auf Basis von SiO<sub>2</sub>-Nanopartikeln (SiNP) begonnen. Dazu wurden die SiNP mit CaO und Wasser versetzt. Es wurden verschiedene Verhältnisse von SiNP und CaO einerseits, wie auch das Volumen an zugesetztem Wasser angesetzt. Zu diesen Proben wurde dann Eu(III) als Analogon für dreiwertige Actinoide (bzw. als optische Sonde) gegeben. Die Proben wurden daraufhin zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Zugabe des Eu(III) mittels zeitaufgelöster Laserfluoreszenzspektroskopie vermessen. Es wurden die spektrale und kinetische Kenngrößen gemessen. Die hergestellten Templates

wurden/werden parallel mittels Elektronenmikroskopie und Pulverdiffraktometrie (XRD) charakterisiert.

Im AP2 wurden erste Untersuchungen zum Komplexierungsverhalten des Zementzusatzstoffs, einem dem Citrat ähnlichen Phosphonat mit Eu(III) durchgeführt. Es wurde die Komplexierung anhand von TRLFS-Daten verfolgt. Die TRLFS-Experimente wurden bei verschiedenen pH-Werten und Ionenstärken durchgeführt. Bei der Auswahl der pH-Werte wurde das komplexe Deprotonierungsverhalten des Zementzusatzstoffs berücksichtigt, um so die potentielle Verfügbarkeit von einfach-, zweifach- usw. deprotonierten Ligand-Spezies zu kontrollieren und die Speziationsuntersuchungen vom einfachen zum komplexen Verhalten definiert zu verfolgen. Die Beschaffung des OPO-Lasermoduls wie auch des iCCD-Kameramodul wurde initiiert und beauftragt. Die Lieferungen der Komponenten sind ab Ende März 2021 avisiert.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

In AP1 werden die Untersuchungen der CSH-Templatphasen intensiviert bzw. fortgeführt. Die Nutzung von SiNP als Startmaterialien wird fortgesetzt und der untersuchte Parameterraum (pH-Werte, C:S Verhältnis, Feststoff-zu-Flüssigkeit-Verhältnis) erweitert. Mit den Proben werden dann entsprechende TRLFS-Untersuchungen durchgeführt. Neben Eu(III) als Lumineszenzsonde wird nach erfolgreicher Installation des iCCD-Moduls auch Yb(III) eingesetzt. Gegenüber Eu(III) hat Yb(III) den Vorteil, dass Eisen nicht (oder nur wenig – ist ein Detail, dass es herauszufinden gilt) in eisenhaltigen CSH dessen Lumineszenz löscht. Die verschiedenen CSH-Templatphasen werden auch bzgl. der Sorptionsdauer untersucht. Die TRLFS-basierte Speziation wird durch chemometrische Verfahren (PARAFAC-Analyse) flankiert werden.

In AP2 werden die Arbeiten zur Komplexierung von Ln(III) durch Kieselsäure(n) begonnen. In den ersten Experimenten werden pH- und Ionenstärke-Einfluss für  $c(\text{Si})$  unterhalb der „mononuclear wall“ durchgeführt. Besonders Augenmerk wird hier auf den alkalinen bzw. hyperalkalinen Bereich gelegt werden. Im weiteren Verlauf werden auch höhere Kieselsäure-Konzentrationsbereiche in die Betrachtungen einbezogen und hinsichtlich der Bildung von Polykieselsäuren (und Kolloiden) untersucht. Die Arbeiten zum PBTC werden fortgesetzt und die Daten mit den Kollegen aus Dresden ausgetauscht und gemeinsam bewertet.

Im 2. Quartal 2021 wird eine neue Masterarbeit beginnen und so im AP3 den wissenschaftlichen Nachwuchs im Forschungsfeld erweitern.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bachelor-Arbeit von Frau Victoria Bauer „Einbau von Eu(III) in Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) Nanopartikeln – Inkorporation vs. Oberflächen-Sorption“

Bachelor-Arbeit von Frau Isabel Sontowski „Komplexierung von Europium(III) durch organische Zementzusatzstoffe“

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr.10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11860G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt G		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 374.721,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Stumpf	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Verbundvorhaben wird die Rückhaltung von Radionukliden an Zementalterationsphasen und Bentonit unter geochemischen Bedingungen, die für die Tonformationen in Norddeutschland relevant sind untersucht. Ziel ist die Aufklärung des geochemischen Verhaltens von Actiniden an/in Zementalterationsphasen und Bentonit unter dem Einfluss von Fe(II) und niedermolekularer organischer Liganden und Zementadditiven, die Erarbeitung grundlegender Erkenntnisse zur Wechselwirkung von Actiniden mit silikatischen und organischen Liganden bei mittleren bis hohen Ionenstärken und unter hyperalkalinen Bedingungen, die Nachwuchsförderung im Bereich nukleare Entsorgung sowie der Transfer und die Integration der Ergebnisse für einen Sicherheitsnachweis. Die Arbeiten dieses Teilprojektes beschäftigen sich mit dem Einfluss des von PBTC (2-Phosphanobutan-1,2,4-tricarboxylsäure), das in der Herstellung von Zement verwendet wird und während der Betondegradation freigesetzt werden kann, auf die Speziation von Actiniden im System  $\text{SiO}_2$ /(Polysilikat)-Actinid-Organik unter endlagerrelevanten Bedingungen. Es sollen konsistente thermodynamische Standarddaten zur Komplexierung von PBTC mit Actiniden über SIT-Modellierung bestimmt sowie der Einfluss von PBTC auf die Wechselwirkung von Actiniden in silikathaltigen Lösungen charakterisiert werden. Das Projekt liefert einen wichtigen Beitrag für eine thermodynamisch fundierte Langzeitsicherheitsanalyse von nuklearen Endlagern. Das Forschungsvorhaben erfolgt in enger Kooperation mit den Projekten der Universitäten Mainz, Saarbrücken, München, Potsdam und Heidelberg sowie dem Institut für Ressourcenökologie vom Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf und dem Institut für Nukleare Entsorgung vom Karlsruher Institut für Technologie.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Arbeiten dieses Projekt sind im Wesentlichen in das Verbundarbeitspaket AP2 „Wechselwirkung von Actiniden mit organischen und silikatischen Liganden“ angesiedelt.

*AP-TUI: Untersuchungen zur Wechselwirkung von redoxstabilen Actiniden verschiedener Oxydationsstufen mit PBTC.* Dieses AP beinhaltet die thermodynamische Charakterisierung der Protonierung des PBTC-Liganden, die ausführliche thermodynamische und strukturelle Charakterisierung der Komplexierung der Actinide (u. a. Am(III), Cm(III), Pu(III), Th(IV), U(VI), ggf. inaktive Analoga Eu(III), Nd(III)) mit dem PBTC-Liganden im sauren und alkalischen pH-Bereich als Funktion der Ionenstärke an NaCl und  $\text{CaCl}_2$  sowie Untersuchungen zum Einfluss von Konkurrenzmetallionen (z. B.  $\text{Fe}^{2+}$ ) auf die Komplexierung. Hauptaugenmerk liegt auf der Charakterisierung möglicher ternärer Komplexe. Entsprechende thermodynamische Standarddaten zur Komplexbildung ( $\log_{10}\beta_{n,m}^0$ ,  $\Delta_r H_m^0$ ,  $\epsilon_{j,k}$ ) werden aus SIT-Modellierungen abgeleitet.

*AP-TU1: Untersuchungen zum Einfluss von Zementadditiven auf die Wechselwirkung von redoxstabilen Actiniden/ Lanthaniden in silikatischen Lösungen.* In diesem AP wird der Einfluss von relevanten Liganden (Citrat, PBTC, Gluconat) auf die Eigenschaften von silikatischen Lösungen/Suspensionen bezüglich ihrer Speziation und daraus abgeleitet auf die Wechselwirkungen mit Actiniden untersucht.

Geplant sind Batchsorptionsuntersuchungen mit Actiniden in gut charakterisierten (Poly)silicat-Ligand-Suspensionen. Die Sorptionsisothermen und Verteilungskoeffizienten ( $K_d$ -Werte) sollen als Funktion der Ionenstärke (bis 3 m NaCl, CaCl<sub>2</sub>) und des pH-Wertes bestimmt werden.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Das Projekt ist zum 01.10.2020 bewilligt worden. Die beantragte Wissenschaftlerstelle wurde ausgeschrieben und konnte zum 01.01.2021 besetzt werden, so dass mit den eigentlichen experimentellen Untersuchungen erst Januar 2021 begonnen wurde.

Das bewilligte Mikro-Titrationskalorimeter sowie der bewilligte Controller für das Lichtleiter-Absorptionsspektrometer wurden beschafft.

Im Berichtszeitraum wurden erste mikro-titrationskalorimetrische und absorptionspektroskopische Te-  
stuntersuchungen zur Komplexierung von Nd(III) mit PBTC durchgeführt (I = 0.25 m NaCl, pH = 5).  
Diese Messungen zeigen, dass es zu einer deutlichen Komplexierung von Nd(III) mit PBTC kommt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Durchführungen der Arbeiten zu AP-TU1: Spektroskopische und kalorimetrische Untersuchungen zur Komplexierung von trivalenten Lanthaniden/Actiniden mit PBTC.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11860H</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt H		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 403.292,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Panak	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Thema des Forschungsvorhabens ist die Rückhaltung von Radionukliden (Actiniden) im Nahfeld eines Endlagers für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle in Tonsteinformationen gemäß dem „Standortmodell NORD“. Für den Sicherheitsnachweis eines solchen Endlagers gibt es Wissenslücken zum Einfluss von gelöstem Eisen, das bei der Korrosion der Einlagerungsbehälter freigesetzt wird sowie von organischen und silicatischen Liganden, die aus der Beton- bzw. Zementkorrosion der technischen Barriere resultieren. Deshalb soll der Einfluss von Eisen sowie der organischen und silicatischen Liganden auf die Radionuklidrückhaltung an Zementkorrosionsphasen und dem Bentonitpuffer unter hyperalkalinen Bedingungen bei mittleren bis hohen Ionenstärken quantifiziert werden. Dazu werden die Prozesse Sorption, Diffusion, Komplexierung, Redoxtransformation und Löslichkeit mit experimentellen und quantenchemischen Methoden untersucht und mithilfe von thermodynamischen Modellen beschrieben. Die zu erwartenden wissenschaftlichen Ergebnisse werden den grundlegenden Kenntnisstand auf dem Gebiet der geochemischen Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen deutlich erweitern und tragen damit direkt zur Optimierung einer thermodynamisch fundierten Sicherheitsanalyse zur Langzeitsicherheit von nuklearen Endlagern bei. Des Weiteren werden wichtige grundlegende Erkenntnisse bezüglich des Komplexierungsverhaltens von Actiniden erhalten, die auch in anderen wissenschaftlichen Bereichen von besonderer Bedeutung sind.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP2.1: Komplexierung von Actiniden mit ausgewählten organischen Referenzliganden
- AP2.2: Komplexierung von Actiniden mit ausgewählten Zementadditiven
- AP2.3: Wechselwirkung von Actiniden mit silicatischen Systemen: Speziation und Thermodynamik
- AP3: Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung
- AP4: Transfer der Erkenntnisse und Integration der Ergebnisse für den Sicherheitsnachweis

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen von AP2.2 und in Ergänzung zu den Ergebnissen aus dem Vorgängerprojekt GRaZ I wurde die Komplexierung von  $\text{NpO}_2^+$  mit dem Superplasticizer Glenium®51 mittels VIS/NIR-Spektroskopie untersucht. In den Absorptionsspektren ist mit steigender Glenium®51-Konzentration eine Verschiebung der Absorptionsbande von  $\text{NpO}_2^+$  von  $\lambda = 980.4 \text{ nm}$  zu  $\lambda = 984.4 \text{ nm}$  zu beobachten. Diese Verschiebung konnte der Bildung eines 1:1- $\text{NpO}_2$ -Glenium®51-Komplexes zugeordnet werden. In Analogie zu den Untersuchungen von Cm(III)/Eu(III) mit Glenium®51 konnte auch im Falle des Np(V) nur eine Komplexspezies nachgewiesen werden, die unabhängig von der Temperatur und dem pH-Wert ist. Zur Verifizierung des zugrunde gelegten Komplexierungsmodells werden Steigungsanalysen durchgeführt. Dabei werden die Konzentrationsverhältnisse der komplexierten und nicht komplexierten Np(V)-Spezies in doppeltlogarithmischer Form als Funktion der Ligandkonzentration aufgetragen und die Steigung der Geraden bestimmt. Die Auswertung der Daten ergibt einen linearen Zusammenhang mit einer Steigung von 1. Dies bedeutet, dass die Koordination des Np(V) durch ein sog. „Ladungsäquivalent“ des Liganden unter Bildung eines 1:1- $\text{NpO}_2$ -Glenium®51-Komplexes erfolgt.

Zur Auswertung der Daten wurde das Ladungsneutralitätsmodell verwendet. Dabei wurde aus den Konzentrationsverhältnissen von  $\text{NpO}_2^+$  und dem  $\text{NpO}_2$ -Glenium®51-Komplex eine pH-abhängige Ladungskapazität ermittelt. Die um die LC korrigierte Stabilitätskonstante liegt bei  $\log(\beta') = 4.58 \pm 0.18$ . Sie ist damit deutlich kleiner als die für die trivalenten Lanthaniden und Actiniden ermittelten, die im Bereich von  $\log \beta = 7.5 - 7.9$  lagen. Trivalente Metallionen zeigen eine sehr geringe Temperaturabhängigkeit der Stabilitätskonstanten für die Komplexierung mit Glenium®51 und 52IPEG4,5-PCE, was sich in nur geringen absoluten Werten für die Reaktionsenthalpien ( $\Delta_r H_m^0$ ) äußert. Auch die Speziesverteilung von  $\text{NpO}_2^+$  und der  $\text{NpO}_2$ -Glenium®51-Komplexspezies zeigt keine signifikante Veränderung mit der Temperatur. Aus den temperaturabhängigen Untersuchungen geht hervor, dass die Komplexierung entropiegetrieben ist, während  $\Delta_r H_m \approx 0 \text{ kJ mol}^{-1}$  beträgt. Die Reaktionsentropie liegt im Mittel bei  $93 \pm 27 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Die Komplexierung von  $\text{NpO}_2^+$  mit Glenium®51 ist sehr schnell und es wurden keine langsamen kinetischen Prozesse beobachtet. Weiterhin traten im untersuchten Temperaturbereich zwischen  $20 \text{ °C}$  und  $80 \text{ °C}$  keine unerwünschten Redoxprozesse des Neptuniums durch den organischen Liganden auf.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Erste Untersuchungen zur Komplexierung von Cm(III) mit Orthosilikaten
- Erweiterung des pH-Bereichs für die Wechselwirkung von An(III)/Ln(III) auf den neutralen bis alkalischen Bereich
- Abschluss der Arbeiten zur Komplexierung von Np(V) mit Glenium®51

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.



## **2.2 Vorhaben Bereich 6**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 W 6279</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Neu- und Weiterentwicklung von Konzepten, Methoden und Techniken für die internationale Kernmaterialüberwachung, insbesondere im Rahmen der nuklearen Entsorgung (SAFE-GUARDS-3)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 6: Kernmaterialüberwachung, Feld 6.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2022	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 889.554,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Niemeyer	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Bundesregierung soll in ihren Bemühungen unterstützt werden, in Zusammenarbeit mit der IAEO und Euratom das Verifikationssystem zur Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen weiterzuentwickeln. Neben der ständigen Verbesserung der Effektivität des Überwachungssystems spielen Gesichtspunkte des Kontrollaufwandes (Effizienz) eine zentrale Rolle. Dieser Aspekt hat besondere Bedeutung bei der erweiterten Aufgabenstellung der IAEO durch das Zusatzprotokoll im Hinblick auf die Entdeckung undeckelter Nuklearmaterialien und Nuklearaktivitäten.

Das Vorhaben baut auf den Ergebnissen der vorangegangenen Vorhaben 02W6184, 02W6218, 02W6232, 02W6243, 02W6259 und 02W6263 auf. Die Arbeiten haben Bezug zum BMWi-Förderkonzept „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle - (2015-2018)“, zu den strategischen Zielen des 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (2018) im Rahmen der Entsorgungs- und Endlagerforschung, zum Nationalen Entsorgungsprogramm (2015) sowie zum BMWi-IAEA Joint Programme. Die Arbeiten werden in enger Abstimmung zwischen Regierung, den Kontrollbehörden IAEO und Euratom, Industrie sowie Forschung und Entwicklung geplant und durchgeführt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP6.1: Konzepte zur Kernmaterialüberwachung
  - AP6.1.1: Safeguards-Konzepte für verlängerte Zwischenlagerzeiten
  - AP6.1.2: Safeguards-Konzepte für unterschiedliche Endlagerkonzepte
  - AP6.1.3: Safeguards-Konzepte für kerntechnische Anlagen im Rückbau
- AP6.2: Methoden und Techniken zur Kernmaterialüberwachung
  - AP6.2.1: Einschluss und Überwachung
  - AP6.2.2: Erneute Behälterüberprüfung (Re-Verifikation)
  - AP6.2.3: Methoden zur Entdeckung von unabhängigen Bergbauaktivitäten und Hohlräumen
  - AP6.2.4: Geoinformationstechnologien
- AP6.3: Kooperation, Kommunikation, Kapazitätsaufbau zur internationalen Kernmaterialüberw.
  - AP6.3.1: Kooperation mit der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik (DGAP)
  - AP6.3.2: Pflege des nationalen Safeguards-Internet-Portals
  - AP6.3.3: Nationale Gremien
  - AP6.3.4: Internationale Gremien

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP6.1.1: Erarbeitung der konzeptionellen und technischen Anforderungen an die Safeguardsüberwachung der Zwischenlager in Deutschland bis mindestens 2050
- AP6.1.2: Vorbereitung des Promotionsprojekts zur Safeguardsüberwachung eines HAW Endlagers

- AP6.1.3: Beratung der IAEO zur Entwicklung einer allgemeinen Safeguards-Richtlinie für Anlagen im Rückbau
- AP6.2.1: Vorbereitung von Feldtests zur Eignung von 2D- und 3D-Laserscanning im Rahmen von Einschluss und Überwachung der Brennelementbehälter in den Zwischenlagern
- AP6.2.2: Vorbereitung eines Feldtests zur Eignung der Myonen-Tomographie zur Re-Verifikation von Brennelementbehältern in den Zwischenlagern
- AP6.2.3: Beginn eines Promotionsprojekts zur multitemporalen Satellitenbildanalyse im Rahmen der Safeguardsüberwachung von kerntechnischen Anlagen; Vorbereitung eines Fallbeispiels zum Monitoring von HAW Endlagerstandorten
- AP6.2.4: Evaluierung der IAEO Software "Protocol Reporter 3" (PR-3)
- AP6.3.1: Arbeitsgruppe für Nukleartechnologie und Nonproliferation (AG2N): „Risk and Challenges in the Field of Nuclear Energy, Technology, and Security“: 1. Sitzung am 6. Okt. 2020 - Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung
- AP6.3.2: Aktualisierung des Webportals
- AP6.3.3: Mitarbeit in der Arbeitsgemeinschaft Kernmaterialüberwachung (AKÜ) sowie im Arbeitskreis Spaltstoffüberwachung des VGB PowerTech e.V.
- AP6.3.4: ESARDA: Mitarbeit bei der Vorbereitung und Teilnahme an der Jahrestagung (Nov. 2020, online), Mitarbeit in Gremien (Steering Committee, Executive Board) und Arbeitsgruppen, Leitung von drei Arbeitsgruppen; INMM: Mitarbeit bei der Vorbereitung und sowie Teilnahme an der Jahrestagung (Juli 2020, online), Mitarbeit im Executive Board, Leitung der 'International Safeguards Division'

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP6.1.1: Fortführung der Erarbeitung der konzeptionellen und technischen Anforderungen an die Safeguardsüberwachung der Zwischenlager in Deutschland bis mindestens 2050
- AP6.1.2: Beginn des Promotionsprojekts zur Safeguardsüberwachung eines HAW Endlagers
- AP6.1.3: Fortführung der Beratung der IAEO zur Entwicklung einer allgemeinen Safeguards-Richtlinie für Anlagen im Rückbau, abschließende Prüfung der Richtlinie
- AP6.2.1: Vorbereitung von Feldtests zur Eignung von 2D- und 3D-Laserscanning im Rahmen von Einschluss und Überwachung der Brennelementbehälter in den Zwischenlagern
- AP6.2.2: Vorbereitung eines Feldtests zur Eignung der Myonen-Tomographie zur Re-Verifikation von Brennelementbehältern in den Zwischenlagern
- AP6.2.3: Durchführung eines Promotionsprojekts zur multitemporalen Satellitenbildanalyse im Rahmen der Safeguardsüberwachung von kerntechnischen Anlagen; Vorbereitung eines Fallbeispiels zum Monitoring von HAW Endlagerstandorten
- AP6.2.4: Evaluierung der IAEO Software "Protocol Reporter 3" (PR-3)
- AP6.3.1: Arbeitsgruppe für Nukleartechnologie und Nonproliferation (AG2N): Vorbereitung der 2. Sitzung zum Thema „Entsorgung“
- AP6.3.2: Aktualisierung des Webportals
- AP6.3.3: Mitarbeit in der Arbeitsgemeinschaft Kernmaterialüberwachung (AKÜ) sowie im Arbeitskreis Spaltstoffüberwachung des VGB PowerTech e. V.
- AP6.3.4: ESARDA: Mitarbeit in Gremien (Steering Committee, Executive Board) und Arbeitsgruppen, Leitung von drei Arbeitsgruppen; INMM: Mitarbeit im Executive Board, Leitung der 'International Safeguards Division'; Mitarbeit bei der Vorbereitung der gemeinsamen Jahrestagung von ESARDA und INMM (Aug. 2021)

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- T. Krieger (2020): Analysis of a discrete time critical time Se-No inspection game. Proc. INMM 61th Annual Meeting, Baltimore, USA
- K. Aymanns, I. Niemeyer, A. Jussofie, K. Schoop, J. Pekkarinen, D. Ancius, M. Murtezi, L. Matloch, A. Rezniczek (2020): Challenges in Safeguarding On-site Dry Storage Facilities. Proc. INMM 61th Annual Meeting, Baltimore, USA



## **Information zu Publikationen sowie zu Aus- und Weiterbildung**

In den Halbjahresberichten werden in kurzgefasster Form die Ergebnisse der aktuell bewilligten Forschungsvorhaben dargestellt. Vorhabenrelevante Publikationen werden aufgelistet, soweit es der Platz zulässt, es ist aber nicht immer möglich alle im Rahmen eines FuE-Vorhabens erfolgten Veröffentlichungen (schriftlich oder mündlich) aufzunehmen. Ferner sind Informationen zur Aus- und Weiterbildung wissenschaftlichen Nachwuchses bei den Forschungseinrichtungen nicht explizit abgefragt und ausgewiesen worden.

Es wurde daher beginnend mit dem Jahr 2015 vereinbart, zukünftig Angaben zur Gesamtzahl der Publikationen und zu Ausbildungsaspekten zu machen. Die entsprechenden Daten werden von den Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt.

Die zusammenfassende Darstellung erfolgt im jeweils zweiten Halbjahresbericht eines Kalenderjahres. Damit soll zusätzlich zur Kurzdarstellung der Vorhabenergebnisse in den Fortschrittsberichten dokumentiert werden, dass und wie die FuE-Ergebnisse verbreitet werden.

### **Publikationen**

Im Jahr 2020 erfolgten in rund 82 Veröffentlichungen in begutachteten Journalen, in Form von Schlussberichten, Doktor-, Master-, Bachelor- und Studienarbeiten oder in sonstiger schriftlicher Form die Publikation von Ergebnissen von FuE-Vorhaben durch die geförderten Forschungseinrichtungen.

Zudem wurden im Jahr 2020 rund 100 Vorträge auf Konferenzen, bei Workshops und sonstigen Veranstaltungen gehalten und Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse präsentiert.

### **Aus- und Weiterbildung**

Ein strategisches Forschungsziel der BMWi-Förderung ist die Bereitstellung von Expertise und Wissen, der Erhalt und Ausbau wissenschaftlich-technischer Kompetenz und als wichtiges Element dafür die Unterstützung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Die Aus- und Weiterbildung von Post-Docs, Doktoranden, Masterstudenten erfolgt nahezu ausschließlich durch Universitäten und Einrichtungen der Helmholtz Gemeinschaft. Gleichwohl erfolgt in einzelnen Fällen die Ausbildung und Finanzierung wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation zwischen Universitäten und Unternehmen.

Im Jahr 2020 waren in den hier aufgeführten FuE-Vorhaben 94 Nachwuchswissenschaftler in FuE-Vorhaben eingebunden.



### 3 Verzeichnis der Forschungsstellen

<b>Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Unter den Linden 87, 12205 Berlin</b>		
02 E 11779	MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz, Qualitätssicherung mit Ultraschall (MgO-S3)	154
1501561	Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK	24
<b>BGE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine</b>		
02 E 11193B	Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen	48
02 E 11486B	Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B	70
02 E 11577A	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlager-systemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A	82
02 E 11617A	Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt A	94
02 E 11658B	Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt B	110
02 E 11678	Untersuchungen zur Vervollständigung von Stoffmodellen für Salz- oder Sorelbeton sowie spezieller low-ph und hochdichter bzw. hochfester Betone zum rechnerischen Nachweis der Rissbeschränkung für Bauwerke (UVERSTOFF)	118
02 E 11708B	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B	126
02 E 11718A	Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A	132
02 E 11728	Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein (KOREKT)	136
02 E 11749	Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (TREND)	142
02 E 11839	Entwicklung eines Leitfadens zur Auslegung und zum Nachweis von geotechnischen Barrieren für ein HAW Endlager in Salzformationen (RANGERS)	172

- |   |  |     |
|---|--|-----|
| <b>Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Christian-Albrecht-Platz 4, 24118 Kiel</b>                  |  |     |
| 02 E 11849B   | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt B   | 176 |
| <b>DMT GmbH &amp; Co. KG, Am TÜV 1, 45307 Essen</b>   |  |     |
| 02 E 11718B   | Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B   | 134 |
| <b>Dr. Andreas Hampel, Grünberger Str. 56, 55129 Mainz</b>  |  |     |
| 02 E 11446A   | Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt A                                       | 56  |
| <b>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich</b>                               |  |     |
| 02 E 11607D   | Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt D | 92  |
| 02 W 6279   | Neu- und Weiterentwicklung von Konzepten, Methoden und Techniken für die internationale Kernmaterialüberwachung, insbesondere im Rahmen der nuklearen Entsorgung (SAFEGUARDS-3)              | 222 |
| <b>Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27 c, 80686 München</b> |  |     |
| 1501576   | ProCast - Probabilistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen  | 26  |
| <b>Freie Universität Berlin, Kaiserwerther Str. 16-18, 14195 Berlin</b>                                 |  |     |
| 02 E 11547C   | Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt C                               | 76  |
| 02 E 11849C   | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt C   | 178 |
| <b>Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena</b>                                 |  |     |
| 02 E 11759A   | Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt A  | 144 |
| 02 E 11850E   | Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt E   | 202 |

<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Schwertnergasse 1, 50667 Köln</b>
---

- |             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 02 E 11466  | Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Re-poTREND+)   | 66  |
| 02 E 11486A | Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A                | 68  |
| 02 E 11577B | Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlager-systemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B  | 84  |
| 02 E 11607A | Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungspro-dukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A     | 86  |
| 02 E 11617B | Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskon-zeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt B | 96  |
| 02 E 11627  | Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)  | 98  |
| 02 E 11647  | Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)  | 106 |
| 02 E 11658A | Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismetho-dik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (AN-SICHT II), Teilprojekt A   | 108 |
| 02 E 11668A | Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwen-dungen (SMILE), Teilprojekt A  | 112 |
| 02 E 11698  | Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwir-kungen auf zementbasierte Dichte-elemente (THYMECZ)   | 122 |
| 02 E 11708A | Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Ein-schluss (KOMPASS), Teilprojekt A   | 124 |
| 02 E 11759C | Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt C       | 148 |
| 02 E 11799B | Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt B  | 160 |
| 02 E 11809A | Verbundprojekt: Weiterentwicklung von d <sup>3f++</sup> : Hydrogeologische Modellierung im regionalen Maßstab (HYMNE), Teilprojekt A  | 164 |
| 02 E 11819  | Mineralumwandlung und Sorption bei erhöhten Temperaturen in ge-klüfteten Kristallingesteinen und Barrierematerial (MUSE)  | 168 |
| 02 E 11829  | Tonsteinforschung im Felslabor Mont Terri ab Phase 25 (MonTe-25)  | 170 |
| 02 E 11850B | Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilot-projekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pi-lot), Teilprojekt B  | 196 |

- RS1553A** Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung („ProbBau“)  36
- RS1563** Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern  38
- RS1586A** Spannungsinduzierte Wasserstoffumlagerung in Brennstabhüllrohren während längerfristiger Zwischenlagerung (SPIZWURZ) – Theoretische Beschreibung, Modellierung und Verifizierung  40
- RS1588** Langzeitverhalten trocken zwischengelagerter Brennelemente während der verlängerten Zwischenlagerung  42

**Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden**

- 02 E 11607B** Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B  88
- 02 E 11668B** Verbundprojekt: Smart-K<sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B  114
- 02 E 11748B** Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B  140
- 02 E 11769B** Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt B  152
- 02 E 11860B** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt B  208

**Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ -, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig**

- 02 E 11850A** Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt A  194

**Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, 14473 Potsdam**

- 02 E 11637B** Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt B: Multiskalenansatz  102

**Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau**

- 1501606B** Verbundvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur nichtinvasiven Analyse des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter bei verlängerter Zwischenlagerung - Teilvorhaben: Konzeption und Errichtung eines automatisierten Strahlungsmesssystems zur Durchführung von Experimenten und Zustandsanalyse von TLB  30

- |  |  |     |
|--|--|-----|
| <b>IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstr. 60, 04279 Leipzig</b>                            |  |     |
| 02 E 11446B  | Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B   | 58  |
| 02 E 11708C  | Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C   | 128 |
| <b>Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstraße 21, 55122 Mainz</b>                                    |  |     |
| 02 E 11860A  | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt A   | 206 |
| <b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main</b> |  |     |
| 02 E 11809B  | Verbundprojekt: Weiterentwicklung von $d^3f^{++}$ : Hydrogeologische Modellierung im regionalen Maßstab (HYMNE), Teilprojekt B   | 166 |
| <b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe</b>                           |  |     |
| 02 E 11637C  | Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt C: Geomechanik von Sedimentbecken | 104 |
| 02 E 11799A  | Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt A   | 158 |
| <b>Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover</b>  |  |     |
| 02 E 11446C  | Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt C   | 60  |
| 1501560  | Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK)                                    | 22  |
| 02 E 11849F  | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt F   | 184 |
| <b>Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg</b>           |  |     |
| 02 E 11547A  | Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit soziotechnischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt A  | 72  |
| 02 E 11789   | Wegemanagement bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland (WERA)  | 156 |
| 02 E 11849G  | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt G   | 186 |
| <b>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen</b>                 |  |     |
| 1501615  | Atomistische Untersuchung der Auswirkung von Strahlenschäden auf die Brennelementintegrität in der langfristigen Zwischenlagerung  | 34  |

<b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg</b>
---

- |             |  |    |
|-------------|--|----|
| 02 E 11415H | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H | 54 |
|-------------|--|----|

<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen</b>
---

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 E 11547B | Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B   | 74  |
| 02 E 11607C | Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C               | 90  |
| 02 E 11668C | Verbundprojekt: Smart-K <sub>d</sub> in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C  | 116 |
| 02 E 11759B | Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt B                | 146 |
| 02 E 11849D | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt D   | 180 |
| 02 E 11849E | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt E   | 182 |
| 1501609B    | Spannungsinduzierte Wasserstoffumlagerung in Brennstabhüllrohren während längerfristiger Zwischenlagerung - Experimente zur Bestimmung der Eigenspannungen sowie der Wasserstofflöslichkeit und -diffusion | 32  |
| 02 E 11860C | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt C   | 210 |
| 02 E 11850F | Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt F   | 204 |

<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestraße 6, 09599 Freiberg</b>
---

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 E 11193A | Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen | 46  |
| 02 E 11557  | Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GESAV II)  | 78  |
| 02 E 11769A | Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A  | 150 |
| 02 E 11799C | Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Hauptprojekt (SANDWICH-HP), Teilprojekt C   | 162 |
| 02 E 11850C | Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt C                                   | 198 |

<b>Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin</b>
---

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 E 11849H | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt H | 188 |
|-------------|--|-----|

<b>Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Pockelsstr. 14, 38106 Braunschweig</b>
---

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 E 11446D | Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D | 62  |
| 02 E 11849I | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt I                           | 190 |

<b>Technische Universität Clausthal, Adolph-Römer-Straße 2A, 38678 Clausthal-Zellerfeld</b>
---

- |             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 02 E 11446E | Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E  | 64  |
| 02 E 11567A | Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH <sup>2</sup> M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt A  | 80  |
| 02 E 11688  | Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III)   | 120 |
| 02 E 11708D | Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D  | 130 |
| 02 E 11748A | Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt A | 138 |
| 02 E 11849A | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt A  | 174 |
| 02 E 11850D | Verbundprojekt: Deutsch-chinesische Entsorgungsforschung – Pilotprojekt: Reanalysis of BRIUG THM Mock-up Test (ELF-China-Pilot), Teilprojekt D  | 200 |

<b>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt</b>
--

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 E 11637A | Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt A: 3D-Spannungsmodell und Aufskalierung | 100 |
|-------------|--|-----|

- |   |  |     |
|---|--|-----|
| <b>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden</b>                      |  |     |
| 1501606A  | Verbundvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur nichtinvasiven Analyse des Inventarzustands für Transport- und Lagerbehälter bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Strahlungsbasierte Bildgebung  | 28  |
| 02 E 11860G   | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt G   | 216 |
| <b>Technische Universität Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Straße, 67663 Kaiserslautern</b> |  |     |
| 1501538A  | Verbundvorhaben: Weiterentwicklung der Analysemethoden zur Simulation der Schädigung und der induzierten Erschütterungen in Stahlbetonstrukturen infolge stoßartiger Belastungen (SimSEB) - Teilvorhaben: Verhalten von Stahlbetonstrukturen bei Stoßbelastungen unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung | 18  |
| 1501543B  | Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender kerntechnischer Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer — Teilvorhaben: Besondere Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Besonderheiten großer Stahlbetonquerschnitte sowie der zugehörigen Bestandsaufnahme       | 20  |
| <b>Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg</b>                              |  |     |
| 02 E 11860H   | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt H   | 218 |
| <b>Universität Kassel, Mönchebergstr. 19, 34125 Kassel</b>                                  |  |     |
| 02 E 11849J   | Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt J   | 192 |
| <b>Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München</b>                        |  |     |
| 02 E 11860E   | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt E   | 212 |
| <b>Universität des Saarlandes, Campus Saarbrücken, 66123 Saarbrücken</b>                    |  |     |
| 02 E 11415D   | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D   | 50  |
| <b>Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam</b>                               |  |     |
| 02 E 11415F   | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F   | 52  |
| 02 E 11860F   | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen - Phase II (GRaZ II), Teilprojekt F   | 214 |