

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

**PTE Nr. 55**

BMWi geförderte FuE-Vorhaben zur  
„Entsorgung radioaktiver Abfälle“

Berichtszeitraum: 1. Januar - 30. Juni 2018

Projekträger Karlsruhe (PTKA)  
Entsorgung

**Dezember 2018**

## 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>7</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 .....	41
2.3	VORHABEN BEREICH 6 .....	189
	Information zu Publikationen sowie zu Aus- und Weiterbildung.....	193
<b>3</b>	<b>Verzeichnis der Forschungsstellen .....</b>	<b>195</b>



# 1 Verzeichnis der Vorhaben gemäß FuE-Bereiche

## 1.1 Auswirkung verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter

<b>1501509</b>	Langzeitverhalten von Metall- und Elastomerdichtungen sowie Polyethylen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (LaMEP)	<b>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)</b>	📖 18
<b>1501510</b>	Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (StrukElast)	<b>TU Dresden</b>	📖 20
<b>1501518A</b>	Verbundvorhaben: Grundlegende F&E-Arbeiten zu Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Analysen zu strahlungsbasierten und thermographischen Messverfahren	<b>TU Dresden</b>	📖 22
<b>1501518B</b>	Verbundvorhaben: Grundlegende F&E-Arbeiten zu Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Akustische Messverfahren	<b>Hochschule Zittau/Görlitz</b>	📖 24
<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>	📖 26
<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>	📖 28

<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>	 30
<b>1501561</b>	Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK	<b>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)</b>	 32
<b>RS1552</b>	Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung	<b>GRS</b>	 34
<b>RS1553A</b>	Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung („ProbBau“)	<b>GRS</b>	 36
<b>RS1563</b>	Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern	<b>GRS</b>	 38



## 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>	📖 180
<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>	📖 182
<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>	📖 184



### 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 11243</b>	Langzeitsicherer Schachtverschluss im Salinar – Ergänzende laborative und modelltheoretische Untersuchungen zum HM-gekoppelten Rekompaktionsverhalten der EDZ (LASA-EDZ)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Köln</b>	📖 50
<b>02 E 11294</b>	Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA)	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 54
<b>02 E 11385</b>	Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA)	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 78
<b>02 E 11395</b>	Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschiechten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA)	<b>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover</b>	📖 80
<b>02 E 11405C</b>	Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschiechten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt C	<b>IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig</b>	📖 86
<b>02 E 11425</b>	Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken – Bautechnische Realisierung Technikumsprüfstand mit Durchführung und Auswertung erster Versuche (Salzschnittblöcke)	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 104

<b>02 E 11435</b>	MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl <sub>2</sub> -Lösung (MgO-SEAL)	<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>	📖 106
<b>02 E 11526A</b>	Verbundprojekt: Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern (CREATIEF), Teilprojekt A	<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>	📖 136
<b>02 E 11526B</b>	Verbundprojekt: Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern (CREATIEF), Teilprojekt B	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 138
<b>02 E 11527</b>	Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt A	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 140
<b>02 E 11537</b>	Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt B	<b>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)</b>	📖 142
<b>02 E 11557</b>	Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GE-SAV II)	<b>Technische Universität Bergakademie Freiberg</b>	📖 150
<b>02 E 11577A</b>	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 156
<b>02 E 11587A</b>	Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt A	<b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 160
<b>02 E 11587B</b>	Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt B	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 162
<b>02 E 11597</b>	Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase II: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel (STROEFUN-II)	<b>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>	📖 164
<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>	📖 174
<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>	📖 178

## 1.4 Sicherheitsnachweis

<b>02 E11072A</b>	Verbundprojekt WEIMAR: Weiterentwicklung des Smart-K <sub>d</sub> -Konzepts für Langzeitsicherheitsanalysen – Teilprojekt GRS	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 42
<b>02 E11102</b>	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 44
<b>02 E 11284</b>	Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld (BIGBEN)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 52
<b>02 E 11304</b>	Tonforschung im Untertagelabor Mont-Terri	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 56
<b>02 E 11314</b>	Ermittlung der Stabilitätsbandbreiten redoxdeterminierender eisenhaltiger Korrosionsphasen (KORPHA)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 58
<b>02 E 11324</b>	Entwicklung eines chemisch-hydraulischen Modells für die Prognose des Langzeitverhaltens von Salzbe- ton in Salzformationen (LAVA-2)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 60
<b>02 E 11334A</b>	Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 62
<b>02 E 11334B</b>	Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden</b>	📖 64
<b>02 E 11344A</b>	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 66
<b>02 E 11344B</b>	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.</b>	📖 68
<b>02 E 11344C</b>	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt C	<b>Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald</b>	📖 70
<b>02 E 11344D</b>	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt D	<b>TU München</b>	📖 72

<b>02 E 11365</b>	Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 76
<b>02 E 11405A</b>	Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt A	<b>BGE Technology GmbH, Peine</b>	📖 82
<b>02 E 11405B</b>	Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt B	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	📖 84
<b>02 E 11415A</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A	<b>Johannes-Gutenberg Universität Mainz</b>	📖 88
<b>02 E 11415B</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden</b>	📖 90
<b>02 E 11415C</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt C	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	📖 92
<b>02 E 11415D</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D	<b>Universität des Saarlandes, Saarbrücken</b>	📖 94
<b>02 E 11415E</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt E	<b>TU München</b>	📖 96
<b>02 E 11415F</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F	<b>Universität Potsdam</b>	📖 98
<b>02 E 11415G</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G	<b>TU Dresden</b>	📖 100
<b>02 E 11415H</b>	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H	<b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg</b>	📖 102
<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>	📖 108

<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>	 110
<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>	 112
<b>02 E 11446D</b>	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D	<b>TU Carolus-Wilhelmina zu Braunschweig</b>	 114
<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>	 116
<b>02 E 11456A</b>	Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- $e^2$ ), Teilprojekt A	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b>	 118
<b>02 E 11456B</b>	Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- $e^2$ ), Teilprojekt B	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	 120
<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>	 122
<b>02 E 11476A</b>	Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A	<b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>	 124
<b>02 E 11476B</b>	Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt B	<b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main</b>	 126
<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>	 128
<b>02 E 11486B</b>	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>	 130

- |                    |  |  |       |
|--------------------|--|--|-------|
| <b>02 E 11496A</b> | Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt A  | <b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>                                     | 📖 132 |
| <b>02 E 11496B</b> | Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt B  | <b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen</b> | 📖 134 |
| <b>02 E 11567A</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>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld</b>  | 📖 152 |
| <b>02 E 11567B</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 B | <b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>                                     | 📖 154 |
| <b>02 E 11577B</b> | Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B  | <b>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln</b>                                     | 📖 158 |
| <b>02 E 11607A</b> | 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>                                     | 📖 166 |
| <b>02 E 11607B</b> | 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>  | 📖 168 |
| <b>02 E 11607C</b> | 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> | 📖 170 |
| <b>02 E 11607D</b> | 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>   | 📖 172 |
| <b>02 E 11617B</b> | 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>                                     | 📖 176 |



**02 E 11647** Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der  
Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)

**Gesellschaft für An-  
lagen- und Reaktor-  
sicherheit (GRS)  
gGmbH, Köln**

 186



## 1.5 Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen

- |                    |  |  |       |
|--------------------|--|--|-------|
| <b>02 E 11355</b>  | Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander)   | <b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>   | 📖 74  |
| <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>  | 📖 144 |
| <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> | 📖 146 |
| <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>  | 📖 148 |



## 1.6 Kernmaterialüberwachung

**02 W 6263** Neu- und Weiterentwicklung von Safeguardstechniken und -methoden **Forschungszentrum Jülich GmbH**  190



## **2 Formalisierte Zwischenberichte**

### **2.1 Vorhaben Bereich 1**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 12200 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501509</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Langzeitverhalten von Metall- und Elastomerdichtungen sowie Polyethylen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (LaMEP)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>  01.10.2015 bis 30.04.2019	<b>Berichtszeitraum:</b>  01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b>  373.351,03 EUR	<b>Projektleiter:</b>  Dr.-Ing. Jaunich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen Prognosemodelle zur Bewertung der Langzeiteignung von Metall- und Elastomerdichtungen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (TLB) entwickelt sowie weiterführende Erkenntnisse zur strahleninduzierten und thermischen Alterung des in TLB eingesetzten Neutronenabsorbers Polyethylen gewonnen werden.

An der TU Dresden werden im Rahmen des Vorhabens 1501510 „StrukElast“ Struktureigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen zur differenzierten Bewertung in Kooperation mit der BAM erarbeitet.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

**Metалldichtungen (M):**

Zur Generierung neuer Erkenntnisse über das Verhalten von Metалldichtungen nach thermischer Belastung sollen experimentelle Untersuchungen an vorgealterten Dichtungen durchgeführt sowie Materialmodelle zur rechnerischen Abschätzung des Langzeitverhaltens der Metалldichtungen entwickelt werden.

**Elastomerdichtungen (E):**

Die experimentellen und numerischen Untersuchungen zu Elastomerdichtungen beschäftigen sich mit der Alterung von Elastomeren und dem Einfluss der durch diese hervorgerufenen Eigenschaftsänderungen auf die Dichtfunktion.

**Polyethylen zur Neutronenabschirmung (P):**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets soll der Einfluss der Gammastrahlung in Kombination mit Alterung (Zeit und Temperatur) untersucht sowie eine Apparatur im Großmaßstab zur Bestimmung der Ausdehnungskoeffizienten bzw. des Kriechens der verwendeten Polyethylene gebaut und in Betrieb genommen werden.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- M: Die Untersuchungen an Al- und Ag-Dichtungen wurden fortgesetzt. Es fanden Messungen an Dichtungen mit beiden untersuchten Torus-Durchmessern nach verschiedenen Alterungsdauern (4, 7½ und 9 Jahren) bei Temperaturen zwischen 75 °C und 150 °C statt. Die Messungen zeigten keine vom bisherigen Verhalten abweichenden Versuchsergebnisse. Weiterhin ist eine Abnahme der Verpresskraft und der nutzbaren Rückstellung festzustellen. Messungen an Al-Dichtungen in Vergleichsflanschen nach 1 Jahr bei 150 °C zeigten ähnliche Ergebnisse wie die früheren Messungen. In Untersuchungen zur Geometrie der Verpressung an bis zu 100 Tagen gealterten Dichtungssegmenten wiesen alle Segmente eine Seite mit einer breiteren und eine Seite mit einer schmaleren Dichtspur auf. Eine Verbreiterung der Dichtspuren konnte sowohl mit längeren Alterungszeiten als auch bei höheren Lagerungstemperaturen festgestellt werden.
- E: Es wurden Proben und Versuchsflansche nach 3,6 Jahren aus der Lagerung entnommen. Die Untersuchungen zeigten eine Fortsetzung der bisher beobachteten Verläufe (u. a. einen beständigen Anstieg der gemessenen Druckverformungsreste). Darüber hinaus wurde mit weiteren Versuchen zur Korrelation der Messdaten und zur Verifikation des Dichtungsverhaltens nach schneller, partieller Entlastung begonnen.
- P: Die Vorrichtung zur simultanen Messung der Wärmeausdehnung in drei Raumrichtungen wurde in Betrieb genommen. Erste Vorversuche wurden durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- M: Die Untersuchungen zur Alterung an Metalledichtungen werden fortgeführt.
- E: Die Untersuchungen zur Alterung an Elastomerproben werden fortgesetzt. Die nächste Entnahme gealterter Elastomerproben ist für Oktober 2018 vorgesehen.
- P: Die Arbeiten in Bezug auf die radiologische und die thermische Alterung von Polyethylen-Proben werden fortgesetzt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Journalartikel und Buchbeiträge:

A. Kömmling et al.: „Investigation of Long-Term Behavior of Elastomeric Seals for Transport and Storage Packages“; in: K. van Breugel et al. (Ed.) “The Aging of Materials and Structures”; Springer International Publishing AG; 2018

A. Kömmling et al.: “Effect of high-dose gamma irradiation on (U)HMWPE neutron shielding materials; “Radiation Physics and Chemistry Vol. 142”; ELSEVIER Verlag; 2018

Vorträge:

T. Grelle et al.: „Investigation of Time and Temperature Dependent Behavior of Metal Seals in Radioactive Waste Containers; ASME PVP 2018; Prag; Tschechische Republik

T. Grelle et al.: “Component and material investigations on metal seals for high level radioactive waste containers”; 11th International Conference on the Transport, Storage and Disposal of Radioactive Materials; London, UK

T. Grelle et al.: “Creep Investigations on Aluminium Seals for application in Radioactive Waste Containers”; International Conference on Aluminium Alloys (ICAA16); 2018; Montreal, Kanada

M. Jaunich et al.: “Long Term Performance of Elastomer Seals – From Aging tests to lifetime estimations; ASME PVP 2018; Prag, Tschechische Republik

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>1501510</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (StrukElast)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2015 bis 30.04.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 208.642,28 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Wießner	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen für elastomere Dichtungsmaterialien erarbeitet werden, welche in Prognosemodellen zur Bewertung der Langzeiteignung von Elastomerdichtungen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (TLB) einfließen sollen. Als Ziel sollen belastbare Aussagen zur Langzeiteignung von Elastomerdichtungen in TLB in Abhängigkeit struktursensitiver elastomerspezifischer Werkstoffeigenschaften bereitgestellt werden.

Bei dem Vorhaben handelt es sich um eine Zuarbeit zum Vorhaben 1501509 „LaMEP“ der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturrecherche zur Materialauswahl der Elastormischungen sowie zur Festlegung deren Variation
- AP2: Mischungsherstellung und Vulkanisation mit gezielter Rezepturvariation
- AP3: Charakterisierung von Strukturparametern der erzeugten Modellelastomere
- AP4: Charakterisierung der Modellelastomere hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften
- AP5: Charakterisierung des viskoelastischen Deformationsverhaltens
- AP6: Ermittlung charakteristischer Relaxationszeitspektren und Beschreibung des Spannungsrelaxationsverhaltens
- AP7: Erstellung von Modellen zur Beschreibung der Struktur-Eigenschafts-Korrelation
- AP8: Untersuchung gealterter Proben auf deren Struktur- und Eigenschaftsveränderungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Die im letzten Berichtszeitraum festgelegten HNBR-basierten Modellelastomer-Rezepturen sowie EPDM-basierte Modellelastomer-Rezepturen mit verringertem Vernetzungsmittelgehalt wurden compoundingiert, ihr Vernetzungsverhalten charakterisiert und aus den Mischungen Prüfkörper und Modell-O-Ringe hergestellt. Die Einlagerung erfolgte bei 70 °C, 110 °C und 150 °C. Die Entnahme der Prüfkörper und Modell-O-Ring-Segmente erfolgte nach Alterungszeiten von 24 h, 100 h, 500 h und 1000 h.
- AP3: An den HNBR-Elastomeren wurden Gleichgewichtsquellmessungen, anisotherme Spannungsrelaxationsmessungen (TSSR) sowie Shore-Härte-Tests vorgenommen. Mit zunehmender Alterung weisen die HNBR-Elastomere einen Anstieg der Shore-Härte und der Vernetzungsdichte sowie eine zunehmende Versprödung auf.
- AP4: An unverpresst gealterten HNBR-Prüfkörpern wurden Druckspannungsrelaxationsmessungen durchgeführt. Die resultierenden Spannungsrelaxationskurven wurden mit dem Maxwell-Wiechert-Modell angepasst. Die Untersuchungen zeigten den signifikanten Einfluss der Rezepturparameterkombination „Füllstoffgehalt und Vernetzungsdichte“ auf die Spannungsrelaxation.
- AP5: Das viskoelastische Materialverhalten gealterter HNBR-Elastomere wurde mittels DMA-Messungen charakterisiert und durch Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips Masterkurven erstellt. Bis zu einer Alterungszeit von 500 h konnten die Elastomere erfolgreich vermessen werden, wobei Rezepturen mit hohem Füllstoffgehalt und geringer Vernetzungsdichte auch nach 500 h Alterung noch ein vergleichsweise stark ausgeprägtes gummi-typisches Verhalten aufwiesen. 1000 h Alterung führten hingegen zum völligen Verlust des entropie-elastischen Werkstoffverhaltens.
- AP6: Die Anpassung der HNBR-Masterkurven mittels Multiskalenfit wurde begonnen.
- AP7: Multivariate Analysen zum Einfluss von Rezeptur- und Alterungsparametern auf dichtungsrelevante Eigenschaften wurden durchgeführt, um Korrelationen zwischen Struktur- und Funktionseigenschaften abzuleiten.
- AP8: Der Druckverformungsrest nach verpresster Alterung von Segmenten der Modell-O-Ringe spiegelt besonders sensitiv die rezeptur- und temperaturinduzierten Unterschiede der Eigenschaftsveränderungen der untersuchten Modellelastomere wider.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Vulkanisation der Modell-O-Ringe für noch ausstehende Rezepturen
- AP3: Fortsetzung der Charakterisierung von Vernetzungsdichten an gealterten Proben und Untersuchung des Einflusses der Randbedingungen der Nachvernetzung auf die Strukturparameter der EPDM-Elastomere
- AP4: Durchführung von Spannungsrelaxationsuntersuchungen an gealterten EPDM-Rezepturen mit reduzierter Vernetzungsdichte
- AP5: DMA der gealterten EPDM-Rezepturen mit reduzierter Vernetzungsdichte
- AP6: Weiterführung der Multiskalenfits an den erstellten Masterkurven
- AP7: Fortsetzung der multivariaten Analysen
- AP8: Fortsetzung der Werkstoffcharakterisierungen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>1501518A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Grundlegende F&E-Arbeiten zu Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Analysen zu strahlungsbasierten und thermographischen Messverfahren		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2016 bis 31.01.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 413.887,23 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hampel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Vorhabens besteht in einer Bewertung verschiedener physikalischer Messprinzipien, Verfahren und Methoden zur nichtinvasiven Überwachung des Zustandes des Inventars von Transport- und Lagerbehältern bei verlängerter Zwischenlagerung. Damit sollen Veränderungen der Brennelemente bzw. Behälterstrukturen über Zeiträume von mehreren Jahrzehnten erkannt werden können, ohne die Behälter zu öffnen. Dazu werden in diesem Vorhaben die Messverfahren Strahlungsemissionsmessung (Gammastrahlung, Neutronen), Thermographie und Myonenbildgebung näher untersucht.

Bei dem Vorhaben handelt es sich um ein Teilvorhaben des Verbundes „DCS-Monitor“. Verbundpartner ist die Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG). Der Arbeitsschwerpunkt der HSZG liegt auf akustischen Messverfahren (FKZ 1501518B).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Allgemeine Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik
- AP2: Methodenscreening für Strahlungsemission, Myonen und Thermographie
- AP4: Analyse zum Gamma- und Neutronenstrahlungsfeld mittels Monte-Carlo-Simulation
- AP5: Monte-Carlo-basierte Analysen zur Bewertung der Myonen-Radiographie
- AP6: FEM-Analysen zur Bewertung der Thermographie
- AP10: Entwicklung von Verfahrenskonzepten zur Behälterüberwachung

Die AP3, 7, 8, 9 des Verbundarbeitsplans werden ausschließlich durch den Verbundpartner bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP4: MC-Simulationen wurden durchgeführt, um die Verteilung des Gammaflusses außerhalb der Seitenwände des Behälters sowohl für den Fall von intakten BE als auch für verschiedene Fälle mit beschädigten BE zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass Intensität und Verteilung des Gammaflusses an den Seitenflächen ausreichend ist, um beschädigte BE im äußeren Ring des Tragekorbs zu identifizieren. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass in einem Lagerzeitraum von 50 Jahren zwar die Intensität des Gammaflusses abnimmt, die Verteilung aber fast identisch bleibt.
- AP5: Mittels MCNPX-Simulationen wurde die Eignung der Myonen-Transmissionsbildgebung für die Behälterüberwachung untersucht. Die Resultate zeigen, dass diese in der Lage ist, beschädigte BE unabhängig von ihrer Position im Behälter zu detektieren.
- AP6: Eine Gitterstudie für CFD/FEM-Simulationen ergab, dass min. 2,5 Mio. Gitterelemente für eine geeignete Modellierung eines TLB im Rahmen von Temperatursimulationen notwendig sind. Ein erster Vergleich der Versuchsergebnisse des Verbundpartners mit eindimensionalen Temperatursimulationen zeigte eine weitest gehende Übereinstimmung. Numerische Untersuchungen bzgl. der Möglichkeiten zur Vergrößerung der Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur des Behälters und der Umgebungstemperatur ergaben, dass dies am effektivsten durch Unterdrückung der Konvektion im Behälter umsetzbar wäre. Die Untersuchungen zeigten auch, dass bei einer lokalen Erhöhung des Wärmestroms um 25 % (an der Behälterinnenwand) eine Lokalisierung der Wärmequelle theoretisch möglich ist.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Fortführung der Untersuchungen zu unterschiedlichen Beladungen des Behälters und Beschädigungen des Inventars, Bestimmung des Strahlungsflusses oberhalb und unterhalb des Behälters mit Fokus auf Aussagegehalt bzgl. des Behälterinventars sowie Ermittlung geeigneter Detektorpositionen.
- AP5: Entwicklung eines Simulationscodes zur Bildgebung, Fortsetzung der Untersuchungen zu Beschädigungs- und Beladungsszenarien sowie Ermittlung einer optimalen Detektorgröße und -position.
- AP6: Validierung und Verbesserung des FEM/CFD-Modells sowie Untersuchungen zu potentiellen Maßnahmen zum Erhalt des Temperaturfeldes über lange Lagerzeiträume.
- AP10: Bearbeitung ab Dezember 2018: Aufarbeitung und Klassifizierung der Resultate der AP4, 5, 6 zur Einbindung in das vom Verbundpartner erstellte Grundgerüst.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Hampel, U.; Kratzsch, A.; Rachamin, R.; Wagner, M.; Schmidt, S.; Fiß, D.; Reinicke, S.: Investigations on potential methods for the long-term monitoring of the state of fuel elements in dry storage casks. 2nd Workshop on Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Garching, 2018

M. Wagner et al.: „Simulation-based investigation of suitability of thermography and muon flux measurements for non-invasive monitoring of transport and storage containers for spent fuel“; Proc. of Annual Meeting on Nuclear Technology; Berlin; 29.-30. Mai 2018

S. Schmidt et al.: “Development of a monitoring concept for Transport and Storage Containers for Spent Fuel and Heat-Generating High-Level Radioactive Waste on Prolonged Intermediate Storage”; Proc. of Annual Meeting on Nuclear Technology; Berlin; 29.-30. Mai 2018

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>1501518B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Grundlegende F&E-Arbeiten zu Methoden der Zustandsüberwachung von Transport- und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Akustische Messverfahren		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2016 bis 31.01.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 750.814,95 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kratzsch	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Vorhabens besteht in einer Bewertung verschiedener physikalischer Messprinzipien, Verfahren und Methoden zur nichtinvasiven Überwachung des Zustandes des Inventars von TLB bei verlängerter Zwischenlagerung. Damit sollen Möglichkeiten eruiert werden, Veränderungen der Brennelemente bzw. der aufnehmenden Behälterstrukturen über sehr lange Zeiträume von mehreren Jahrzehnten erkennen zu können, ohne Behälter zu öffnen. Dazu werden in diesem Vorhaben die Messverfahren aktive und passive Schwingungsspektroskopie näher untersucht sowie experimentelle Analysen aller Messmethoden durchgeführt.

Bei dem Vorhaben handelt es sich um ein Teilvorhaben des Verbundes „DCS-Monitor“. Verbundpartner ist die Technische Universität Dresden (TUD). Der Arbeitsschwerpunkt der TUD liegt auf der Strahlungsemissionsmessung, der Thermographie und der Myonenbildgebung (FKZ 1501518A).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Allgemeine Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik
- AP3: Methodenscreening für Messmethode Schwingungsspektroskopie
- AP7: Entwicklung von Zustandserkennungsmethoden für multimodale Behälterüberwachungsdaten
- AP8: Experimentelle Analysen für die Messmethoden Gammastrahlungsemission und Thermographie
- AP9: Experimentelle Analysen für die Messmethode Schwingungsspektroskopie
- AP10: Entwicklung von Verfahrenskonzepten zur Behälterüberwachung

Die AP2, 4, 5, 6 des Verbundarbeitsplans werden ausschließlich durch den Verbundpartner bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP8: Erste Experimente zur Gammastrahlungsemission wurden durchgeführt. Das Ziel war es, eine erste umfassende experimentell ermittelte Datenbasis mit Gammaflussverteilungen für unterschiedliche Versuchsstandkonfigurationen bereitzustellen. Dabei wurde die Anzahl an BE-Dummies im Tragekorb des Behälter-Mockups variiert. Der Aufbau und die Programmierung des Versuchsstandes zur experimentellen Analyse der Messmethode Thermographie wurde abgeschlossen. Im Anschluss wurden erste Experimente durchgeführt. Brennelemente werden in diesen Versuchen mittels Heizstäben im Tragekorb des Behälter-Mockups nachgebildet. Das Ziel war auch hier, eine erste experimentell ermittelte Datenbasis mit Temperaturverteilungen bereitzustellen. In zwei Experimenten wurden die Temperaturverteilungen für einen vollbeladenen CASTOR/V19 nachgebildet. In zwei weiteren Versuchen wurde die Verlagerung von Brennstoff nachgebildet, indem ein Heizelement am Rand des Tragekorbs deaktiviert und dafür eine Heizfolie an dessen Fuß betrieben wurde. Es konnte jedoch keine signifikante Abweichung zu den Temperaturverteilungen der beiden erstgenannten Versuche festgestellt werden.
- AP9: Die Versuchsstände für die experimentellen Analysen der Messmethoden Schwingungs- und Schallemissionsanalyse wurden aufgebaut und in Betrieb genommen. Ein erstes Experiment zur Schwingungsanalyse befasste sich mit den Schwingungsantworten unterschiedlich befüllter BE-Dummies. Die Befüllungen der BE-Dummies konnten anhand der aufgezeichneten Frequenzspektren unterschieden werden. Am Versuchsstand für die Schallemissionsanalyse wurde ein erstes Inbetriebnahmeexperiment durchgeführt. Dabei wurde ein unbeschädigtes Prüfrohr bei 513 bar Druck und einer Temperatur von ca. 330 °C im Berstcontainer zum Platzen gebracht.
- AP10: Es wurde ein erster Ansatz für ein Monitoring-Konzept erarbeitet. Das Konzept sieht periodisch wiederkehrende Messungen mittels Gammastrahlungsanalyse u. a. sowie eine kontinuierliche Überwachung mittels Schallemissionsanalyse vor. Die Messmethode Myonentransmission soll für die Erlangung detaillierter Aussagen bei festgestellten möglichen Zustandsänderungen bzw. Schädigungen zum Einsatz kommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP7: Weiterentwicklung eines Konzepts für eine TLB-Zustandserkennung mit Schwerpunkt auf Identifikation und Analyse von Klassifikationsalgorithmen
- AP8: Fortführung der Experimente zur Gammastrahlungsemission und Thermographie
- AP9: Fortführung der Experimente zur aktiven und passiven Schwingungsspektroskopie
- AP10: Weiterentwicklung des erarbeiteten Ansatzes für das Monitoring-Konzept

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- S. Schmidt et al.: "Development of a Monitoring Concept for Transport and Storage Containers for Spent Fuel and Heat-Generating High-Level Radioactive Waste on Prolonged Intermediate Storage; Proc. of the 49<sup>th</sup> Annual Meeting on Nuclear Technology (AMNT49); Berlin; 29.-31.05.2018
- A. Kratzsch et al.: "Investigations on potential methods for the long-term monitoring of the state of fuel elements in dry storage casks; 2<sup>nd</sup> Workshop on Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel; Garching; 06.-08.06.2018

<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> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 460.820,88 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: Das analytische Zweimassenmodell für den weichen Stoß wurde mit weiteren Versuchen getestet. Es wurde ersichtlich, dass der zur Simulation angesetzte Durchstanzwinkel aufgrund seines großen Einflusses auf die Verschiebung des ausgebrochenen Kegels, die Schadensklasse beeinflussen kann. Hinsichtlich des Aufpralls harter Projektile wurde das erweiterte Zweimassenmodell weiter untersucht. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Untersuchung der angesetzten Last-Zeit-Funktion. Um diesen Ansatz zu verifizieren wurden die Aufpralldauer sowie der Gesamtimpuls aktueller experimenteller Tests mit der berechneten Last-Zeit-Funktion verglichen. Der Vergleich mit Versuchsergebnissen aktueller Impakt-Tests (TU Dresden, VTT etc.) zeigte, dass die angesetzte Last-Zeit-Funktion signifikante Abweichungen zu der in Realität erfassten Impulszeit aufweist.
- AP2: Zur Berücksichtigung der dynamischen Boden-Bauwerk-Wechselwirkung wurde der Fokus auf die PML-Methode ("Perfectly Matched Layers") gelegt. Neben der PML-Methode wurden auch Be-



rechnungen mit einem ausgedehnten Netz („extended mesh“) und viskosen Dämpfern durchgeführt. Der Vergleich zwischen der Methode mit ausgedehntem FE-Netz und viskoser Dämpfung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Wellen die von dem FE-Bereich in die PML Region übergehen, werden nahezu perfekt absorbiert, eine Reflektion findet nicht statt.

- AP3: Durch die Umsetzung und Gegenüberstellung bestehender empirischer und semi-empirischer Formeln konnten die bisher wenig beachteten Impaktversuche der UKAEA analysiert werden. Die Auswertung zeigte, dass die Widerstandsfähigkeit der Stahlbetonstrukturen durch die meisten Formeln überschätzt wird.
- AP4: Im Rahmen der Teilnahme am IRIS 3 Benchmark sollen Berechnungsmethoden zur Ermittlung der induzierten Erschütterungen erprobt, verifiziert und kalibriert werden. Hierfür wurde in der ersten Phase das Simulationsmodell für den V1-Verifikationsversuch sowie das Modell für den Blindtest umgesetzt. Lagerungsbedingungen, Projektil, Beton und Bewehrung wurden unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften diskret modelliert. Es wurden erste Studien zu Elementgrößen, Materialparameter des K&C-Betonmodells, Anwendung weiterer Betonmodelle, Hourglasstypen etc. durchgeführt.
- AP5: Es wurden die wesentlichen Zwischenlagerkonzepte, STEAG und WTI, analysiert. Das STAEG-Konzept soll aufgrund der massiveren konstruktiven Umsetzung bereits einen Beitrag zur Sicherung der Castor-Behälter vor einem Flugzeugabsturz leisten und wurde aus diesem Grund für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Mit der Umsetzung des Analysemodells Zwischenlager wurde begonnen. Parallel wurden verschiedene Triebwerksmodelle verschiedener Flugzeugtypen numerisch modelliert und die wesentliche Turbinencharakteristik umgesetzt. Erste Simulationen der Turbinen auf einfache Stahlbetonstrukturen zeigen qualitativ richtige Versagensformen sowie Last-Zeit-Funktionen.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Da die Lasteinwirkung sowie der zugehörige Verlauf bereits als wichtiger Einflussparameter identifiziert wurden, sollen hierzu weitere Ansätze eventuell auch ohne einen konventionellen Lastansatz untersucht werden.
- AP2: Die Effektivität und Brauchbarkeit der PML-Methode soll an weiteren Beispielen, wie dem modellierten Zwischenlager, im Frequenz- und Zeitbereich untersucht und bewertet werden. Hier soll der Einfluss der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung bei Anprallszenarien quantifiziert werden.
- AP3: Neben den bestehenden empirischen und semi-empirischen Formeln sollen die vereinfachten Ansätze und Rechenmodelle für den harten sowie den weichen Projektilaufprall weiterentwickelt werden.
- AP4: Sobald das Berechnungsmodell mit den Anpassungen fertig verifiziert ist, sollen weitere Einflussfaktoren der induzierten Erschütterungen untersucht werden.
- AP5: Zunächst werden die entwickelten Turbinenmodelle weiter verifiziert und ergänzende numerische Analysen durchgeführt. Mit Hilfe der erstellten Modelle für Zwischenlager und Turbine sollen Fallbeispiele mit variierenden Turbinentypen sowie Aufprallgeschwindigkeiten getestet werden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Feldbusch, A.; Sadegh-Azar, H.: Numerical Implementation of Approaches Considering Dynamic Soil-Structure-Interaction, in: Proceedings of the 49th Annual Meeting on Nuclear Technology, Berlin, Mai 2018

Pascal, D.; Sadegh-Azar, H.: Airplane crash analysis: Semi-hard and hard missile impact on reinforced concrete structures, in: Proceedings of the 49th Annual Meeting on Nuclear Technology, Berlin, Mai 2018

<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 30.06.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 245.580,20 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr.-Ing. Schnell	

## 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

- AP1: Die Arbeiten zur Darstellung der Grundlagen für die zuverlässigkeitsorientierte Bewertung und Nachrechnung kerntechnischer Gebäude wurde mit der Aufarbeitung der im Eurocode 0 für Hoch- und Ingenieurbauwerke implementierten Verfahren zur Sicherstellung der Bauwerkszuverlässigkeit fortgesetzt. Hierbei wurden neben den in der Praxis gebräuchlichen Verfahren (semiprobabilistische Verfahren) auch probabilistische Methoden berücksichtigt. Weiterhin wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zu (semi-)probabilistischen Verfahren zur Nachrechnung bestehender Tragwerke durchgeführt. Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Verfahren auf die Bewertung kerntechnischer Bauwerke wurden zudem die wesentlichen zuverlässigkeitstheoretischen Grundlagen bei der Bemessung kerntechnischer Bauwerke zusammengestellt.
- AP2: In einer weiteren Literaturrecherche wurden verschiedene Verfahren zur Anpassung des Zuverlässigkeitsindex gesichtet und analysiert. Im Fokus der Betrachtung standen dabei das Restnutzungsdauerkonzept, die wirtschaftliche Optimierung sowie der Life Quality Index (LQI). Im Anschluss wurde die Anwendbarkeit dieser Verfahren zur Anpassung des Zuverlässigkeitsindex auf bestehende kerntechnische Bauwerke überprüft und notwendige Anpassungen vorgenommen.
- AP4: Mit Fokus auf die im DAfStb-Heft 619 beschriebenen Abläufe wurde die Zusammenstellung der gebräuchlichen Verfahren und Arbeitsschritte zur Durchführung einer qualifizierten Bestandsaufnahme sowie die Bewertung deren Übertragbarkeit auf kerntechnische Bauwerke fortgeführt. Eine weitere von diesen Verfahren nicht berücksichtigte Besonderheit großer Betonquerschnitte stellen die ausgeprägten Umlagerungsmöglichkeiten dar, die durch ihre Erfassung zu einer deutlichen Tragfähigkeitssteigerung führen können. Um diese Umlagerungsmöglichkeiten zu quantifizieren, wurden erste Versuche unter Variation der Betonfestigkeitsklasse und der Streuung durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Durchführung weiterführender Versuche zur Untersuchung des Einflusses von Zuschlagsgröße, Zuschlagsart, Belastungsgeschwindigkeit und Maßstabeffekten auf das Betonverhalten
- AP5: Beginn der Arbeiten zur Berücksichtigung von Monitoring-Maßnahmen bei der Zuverlässigkeitsbewertung
- AP6: Beginn der Arbeiten zur Erarbeitung einer Methodik zur Ermittlung der vorhandenen Zuverlässigkeit bestehender kerntechnischer Bauwerke

### 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 30.11.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.12.2017 bis 31.12.2017	
<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 Modellexperimente 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: Modellexperimente 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**

Mit den Arbeiten konnte im Berichtszeitraum noch nicht begonnen werden. Der Start der Arbeiten ist für den Berichtszeitraum 2018-2 vorgesehen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP1: Literaturrecherche mit Fokus auf die für die Hüllrohrintegrität relevanten Umgebungsbedingungen und deren Änderung über die Lagerzeit.

AP2: Beginn der materialwissenschaftlichen Untersuchungen an Zirkonium-Legierungen.

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

Keine.

<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 31.03.2021	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.04.2018 bis 30.06.2018	
<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 Versagenkriteriums für Brennstabhüllrohre
- AP4: Validierung der entwickelten numerischen Modelle mittels experimenteller Untersuchungsergebnisse
- AP5: Abschlussbericht

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

AP1: Die Arbeiten im Vorhaben wurden mit einer Durchsuchung der Datenbanken wissenschaftlicher Verlage auf einschlägige Veröffentlichungen begonnen. Der Fokus der Recherche lag dabei auf Veröffentlichungen im Journal of Nuclear Materials. Darüber hinaus hat die BAM am „Second Research Coordination Meeting“ des „Coordinated Research Project (CRP) on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR-IV)“ der IAEA teilgenommen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP1: Fortführung der systematischen Literaturrecherche

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

T. Orellana Pérez et al.: „R&D initiatives at BAM concerning spent nuclear fuel integrity during long term storage“; 2<sup>nd</sup> GRS Workshop on Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, 06.-08.06.18; Garching

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>RS1552</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung (BREZL)			
<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> 01.04.2017 bis 29.02.2020		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 923.990,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Stuke	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung bei Fragen zur Integrität und Handhabbarkeit von Brennelementen nach verlängerter Zwischenlagerung. Der Anwendungszweck dieses Werkzeuges ist die Identifikation und Analyse der interessierenden Zeitskalen, Brennstäbe und –elemente sowie der Behälterladungen. Zur Berücksichtigung der gesamten Phänomenologie des Hüllrohrverhaltens während der Lagerphase, bestehend aus der Nasslagerung, dem anschließenden Trocknungsprozess sowie dem langsamen Abkühlen während der Lagerphase in trockener Inert-Umgebung, soll das zu schaffende Werkzeug umfassend und konsistent die relevanten Größen wie Abbrände, Hüllrohrmaterialien, Behälterladungen, Zeitdauern, Temperaturen, Drücke und Spannungen berücksichtigen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Temperaturfeldberechnung:  
Erstellung einer Datenbasis bzgl. Abbrand, Nachzerfallsleistung, Nuklidinventar und Aktivität möglicher Varianten eingelagerter Brennelemente sowie von Modellen und Methoden zur Berechnung des Temperaturfeldes im Behälter über die zu betrachtenden Lagerzeiträume.
- AP2: Brennstabverhalten:  
Entwicklung von Modellen und Methoden zur Beschreibung der für die Hüllrohrintegrität entscheidenden Parameter unter den Bedingungen der verlängerten Zwischenlagerung.
- AP3: Erstellung von Datenbanken und Schnittstellen:  
Bereitstellung einer Datenbankstruktur für die generierten relevanten Daten sowie von Schnittstellen zwischen den für die verschiedenen Berechnungsschritte verwendeten Codes.
- AP4: Verfolgung aktueller Forschungsarbeiten:  
Zusammenstellung und Bewertung aktueller Erkenntnisse aus der nationalen und internationalen Forschung zur Langzeit trockenlagerung sowie Austausch mit den in diese Forschung involvierten Forschungsstellen.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Ein Programm zur Berechnung der Nachzerfallsleistung von LWR-Brennelementen mit verschiedenen Berechnungsstandards (ANSI/ANS-5.1-2005, DIN 25463-1:1990 u. a.) wurde erstellt. Mit COBRA-SFS durchgeführte Berechnungen zu Temperaturfeldern (in 3D) wurden mit Rechnungen mit COCOSYS und ANSYS-CFX verglichen. Aufgrund verschiedener Rechenmethoden und erlaubten Detailgraden in den Codes zeigte der Vergleich einige Abweichungen in den Ergebnissen.
- AP2: Eine Literaturrecherche bzgl. der Wasserlöslichkeit in Zirkonium-Legierungen zeigte eine starke Streuung der verfügbaren experimentellen Ergebnisse. Häufig weisen bspw. die Grenzkonzentrationen für das Auflösen von Hydriden (TSSd) und das Ausscheiden von Wasserstoff in Form von Hydriden (TSSp) u. a. Überschneidungen von Unsicherheiten auf. Erste Analysen mit neu implementierten Diffusionsgleichungen in TESP-ROD ergaben, dass der Effekt der axialen Diffusion aufgrund von Konzentrations- und Temperaturgradienten gering ist. Weiterhin wurde in TESP-ROD ein Modell zur Vorhersage der Hydridausscheidung mit Kriterien für deren Orientierung abhängig von Hüllrohrspannungen und -temperaturen implementiert. Hiermit durchgeführte Analysen zeigten bspw., dass hohe Temperaturgradienten in der Hüllrohrwand zu azimutalen Hydriden führen. Darüber hinaus wurde der Einfluss des Pelletschwellens sowie die Auswirkungen betrieblicher Spaltgasfreisetzungen auf das Hüllrohrverhalten in der Langzeitlagerung untersucht. Die Untersuchungen ergaben u. a., dass ein Betriebsende unter (nahezu) Volllast sowie geringe Spaltgasfreisetzungen im Betrieb in hohen Hüllrohrspannungen während der Langzeitlagerung resultieren.
- AP3: Die Datenbank der experimentellen Werte für die Bestimmung der TSSd und TSSp-Werte wurde u. a. um fundierte Unsicherheitswerte erweitert sowie die Möglichkeit einer grafischen Darstellung von benutzerdefinierten Datensätzen geschaffen. Weiterhin wurde die grafische Darstellung berechneter Temperaturfelder ermöglicht.
- AP4: Im Berichtszeitraum nahm die GRS u. a. an der AMNT 2018 und am EPRI ESCP International Subcommittee Meeting teil. Weiterhin wurde der „2<sup>nd</sup> Workshop on Safety on Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel“ bei der GRS in Garching ausgerichtet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Implementierung weiterer Standards zur Nachzerfallsleistungsberechnung sowie Bereitstellung eines Skripts zum Vergleich von Normen und Best-Estimate-Werten. Verbesserung des COBRA-SFS-Behältermodells.
- AP2: Auswahl von geeigneten Methoden zur makro- und mikroskopischen Vorhersage der Gestalt von Hydriden, Untersuchung des Kriechverhaltens radial ausgerichteter Hydride und Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der DBTT für TESP ROD.
- AP3: Erweiterung der grafischen Darstellung der Temperaturfelder um eine zeitl. Auflösung.
- AP4: Teilnahme an der NuMat2018 und am EPRI ESCP Winter Meeting u. a.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- P. Kaufholz et al.: “Influence of kinetic effects on terminal solid solubility of hydrogen in zirconium alloys”; arXiv.org (<https://arxiv.org/abs/1805.00529>)
- H. G. Sonnenburg: “TESPA-ROD prediction of the fuel rod behavior during long term storage”; 49th Annual Meeting of Nuclear Technology (AMNT); 29.-30.05.2018; Berlin  
veröffentlicht in: atw. Vol. 63, Ausgabe 6-7, 2018

<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 14.06.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 341.390,00 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

- AP1: Die fortlaufende Recherche ergab, dass die Methoden des konventionellen Bauwesens zur probabilistischen Bewertung von kerntechnischen Bestandsbauwerken zum größten Teil anwendbar sind. Die von der ESK für Zwischenlagerbauwerke aus den Schutzziele abgeleiteten Anforderungen beinhalten u. a. die „Auslegung gegen Störfälle und Maßnahmen zur Reduzierung der Schadensauswirkungen von auslegungsüberschreitenden Ereignissen.“ Weitere Bauanforderungen betreffen bspw. die Berücksichtigung der Temperaturbeanspruchung durch Wärmeabgabe der Behälter und die Alterungsbeständigkeit der Baustrukturen. Das Zwischenlagerkonzept in Deutschland sieht vor, dass das Zwischenlagergebäude allen Einwirkungen standhalten muss, die das Inventar und die Komponenten des Lagers unzulässig beeinträchtigen können. Die Anforderungen muss das Bauwerk auch für verlängerte Nutzungsdauern erfüllen.
- AP2: Weiterhin wurden die Festlegungen des Zuverlässigkeitsindex für normale konventionelle Bauwerke (Schadensfolgeklasse gemäß Eurocode i. d. R.: CC2) sowie für öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (Eurocode Schadensfolgeklasse CC3) recherchiert. Kerntechnische Bauwerke gehören i. d. R. zur CC3, wobei bei Festlegung des Mindestwerts des Zuverlässigkeitsindex zwischen kerntechnisch sicherheitsrelevanten und sonstigen kerntechnischen Gebäuden (hierzu zählen u. a. auch Zwischenlager) unterschieden wird. Eine weitere Recherche zur Auslegung von Zwischenlager in Deutschland ergab, dass zurzeit der Auslegung (Ende 1990er, Anfang 2000er) die damals gültigen Baunormen des konventionellen Bauwesens angewendet wurden (bspw. DIN 1045-1). Die Festlegung des Zielzuverlässigkeitsindex für die Nachrechnung bestehender Bauwerke befindet sich aktuell noch in der Entwicklung. Für das konventionelle Bauwesen existieren erste Vorschläge aus den Niederlanden bzgl. der Reduzierung des Zuverlässigkeitsindex für Bestandsbauwerke.
- AP3: Auf Anfrage der WGIAGE wurde im Rahmen der durchgeführten OECD/NEA Aktivität zusätzliche Fragen zur Bemessung sicherheitsrelevanter kerntechnischer Bauwerke mit entsprechender Terminologie ausgearbeitet und verteilt. Die Auswertung ergab, dass die Bemessung dieser in Europa mittels Eurocodes erfolgt und nur für wenige Aspekte (bspw. Bemessung von Linern) eine Ergänzung der konventionellen Normen durch weitere Regeln erforderlich ist.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Abschließende Dokumentation der Recherche zum Standes von W&T.
- AP2: Fortführung der Analyse internationaler Normenentwicklung mit Fokus auf qualifizierte Bestandsaufnahmen.
- AP3: Fertigstellung des Task Reports für OECD/NEA WGIAGE-Aktivität bzgl. international angewendeter Methoden zur Bemessung kerntechnischer Bauwerke.
- AP5: Auswahl von geeigneten Ansätzen aus dem konventionellen Bauwesen für eine Anpassung zur Berücksichtigung der Ergebnisse aus von Monitoring-Maßnahmen.
- AP6: Kombination der o. g. Ansätze mit Ergebnissen aus dem Monitoring.
- AP7: Planung erster Schritte für die Methodenentwicklung.

### 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> 01.05.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 520.315,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. 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**

AP1: Es wurden Normen, wie bspw. Eurocode 2 sowie Empfehlungen von Sachverständigenorganisationen, wie dem American Concrete Institute, und Fachliteratur hinsichtlich der Beschreibung von Kriechen und Schwund sowie der Alkali-Kieselsäure-Reaktion mit vereinfachten Berechnungsmethoden ausgewertet.

AP2: Die in der GRS eingesetzten Simulationsprogramme ANSYS Mechanical und LS-DYNA wurden hinsichtlich der Implementierungsmöglichkeiten von Alterungsmechanismen für den Werkstoff Beton untersucht. Vereinfachte Berechnungsmethoden aus der Fachliteratur wurden zusammengetragen und gegenübergestellt, um deren Einsatzmöglichkeiten in den Programmen zu bewerten.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP1: Die Fachliteratur soll weiter ausgewertet werden.

AP2: Die Recherche hinsichtlich der Implementierung von Alterungs- und Schädigungsmechanismen in die Simulationsprogramme soll fortgesetzt werden.

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

Keine.



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

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11072A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WEIMAR: Weiterentwicklung des Smart-K <sub>d</sub> -Konzepts für Langzeitsicherheitsanalysen – Teilprojekt GRS	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2012 bis 28.02.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 28.02.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.925.553,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Noseck

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt WEIMAR (Partner: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig) dient zur Weiterentwicklung des Smart-K<sub>d</sub>-Konzepts für Langzeitsicherheitsanalysen, welches im Rahmen des Vorhabens ESTRAL entwickelt und in das Rechenprogramm r<sup>3t</sup> implementiert wurde. Nach einer Qualifizierung des neuentwickelten Rechenprogramms sollte dieses Konzept so erweitert werden, dass weitere, in natürlichen Systemen wichtige Prozesse berücksichtigt werden. Hierzu zählen die Rückkopplung von Redoxreaktionen und Ionenaustausch- bzw. Sorptionsreaktionen mit verschiedenen Einflussgrößen sowie die Berücksichtigung von Wässern mit sehr hoher Ionenstärke, bei denen der Pitzer-Formalismus anzuwenden ist. Diese Prozesse sollen nun berücksichtigt werden, um die Vorgänge noch realitätsnäher abzubilden und das Programm auf weitere Systeme anwendbar zu machen. Das hier zu entwickelnde Konzept ist sowohl auf andere Formationen als auch auf andere Codes übertragbar und gestattet somit auch einen Wissenstransfer auf andere Forschungsfelder.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Vergleichsrechnungen mit anderem Code  
(Qualifizierung des neuen Rechenprogramms, z. B. mit Programmcode PHAST)
- AP2: Implementierung zusätzlicher Prozesse, Komponenten und Einflussgrößen  
(Erarbeitung eines aktualisierten konzeptuellen Modells zur Berücksichtigung weiterer wichtiger Prozesse und Einflussgrößen, z. B. Redoxprozesse, höhere Ionenstärken)
- AP3: Laborexperimente  
(Sorptions- und Säulenexperimente im Rahmen von Promotionsarbeiten)
- AP4: Erzeugung von SCM-Datensätzen und K<sub>d</sub>-Wert Matrizen  
(Gewinnung thermodynamischer Sorptionsdaten und K<sub>d</sub>-Berechnung)
- AP5: Berücksichtigung weiterer externer FEPs  
(Umsetzung weiterer FEPs/Szenarien in Strömungs- und Transportmodellen)
- AP6: Anwendungsrechnungen (Strömungs- und Transportrechnungen)
- AP7: Qualitätsmanagement/Dokumentation



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

AP3: Abschluss der Säulenexperimente mit Ni und Muskovit.

AP7: Durchführung eines abschließenden Projekttreffens mit dem Verbundpartner HZDR in Leipzig.  
Fertigstellung des Abschlussberichts.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine.

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

Noseck, U., Brendler, V., Britz, S., Stockmann, M., Fricke, J., Richter, C., Lampe, M., Gehrke, A., Flügge, J.: Smart  $K_d$ -concept for long-term safety assessments. Extension towards more complex applications. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)gmbH, FKZ 02E11102 (BMWi), GRS-500, Braunschweig 2018 (to be published)

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11102</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.03.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 31.03.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 2.384.037,00 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 Langzeitsicherheitsnachweisen und Einbringung nationaler Interessen in internationale Aktivitäten.
- Weiterentwicklung methodischer 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.

TA2: Bearbeitung von Schwerpunktthemen

- Entwicklung methodischer Ansätze im Hinblick auf die Abwägung zwischen Sicherheit in der Betriebsphase und Langzeitsicherheit.
- Weiterführende Untersuchungen zur Aufsättigung von Bentonithaltigen Buffermaterialien im Hinblick auf die Aufsättigungsdynamik bei begrenztem Wasserangebot.

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

TA1:

- Teilnahme an der nächsten Sitzung des Salt-Clubs.
- Fertigstellung des Berichts zum Thema Set of Essential Records (SER) und Teilnahme am Abschluss-Treffen des NEA Projekts RK&M in Paris.
- CAST: Fertigstellung der Beiträge zu den Deliverables D6.3 und 6.4 sowie Teilnahme und Vortrag beim Abschluss-symposium in Lyon.
- Fertigstellung des Projektabschlussberichts.

TA2:

- Abschluss der Versuche zur Bentonitaufsättigung bei begrenzter Wasserzufuhr und Dokumentation.
- Fertigstellung des Berichts zu Analoga-Studien in Ton.
- Analyse von Modellsystemen anderer Länder im Rahmen der gemeinsamen Aktivität zur Sensitivitätsanalyse.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine.

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

U. Noseck et al.: Scientific Basis for a Safety Case of Deep Geological Repositories. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)gGmbH, FKZ 02 E 11102 (BMWi), GRS-501, Braunschweig 2018 (to be published)

Fahrenholz, Ch., Meleshyn, A., Noseck, U., Rübel, A., Wolf, J.: Analogue studies for a repository for heat generating radioactive waste in clay. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)gGmbH, FKZ 02 E 11102 (BMWi), GRS-502, Braunschweig 2018 (to be published)

<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 31.08.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 2.881.392,00 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 modelltheoretischen Beschreibung des Materialverhaltens für die rechnerische Nachweisführung. Untersuchungsschwerpunkte sind Füllsäulen aus verdichtetem Steinsalz, Kalotten aus Basaltsteinen als Zusatzelemente in setzungsstabilen Schottersäulen, Widerlagerelemente aus MgO-Beton, Weiterentwicklung von Vergütungsverfahren für konturnahe Gebirgsbereiche und Kontaktzone, Weiterentwicklung der Bauausführung und Qualitätskontrolle von Asphalt dichtungen, Zusatzuntersuchungen zum Bentonitdichtelement (z. B. Integration von Äquipotentialsegmenten), Modelltheoretische Analyse von Bauzuständen sowie Belastungs- und Strömungsprozessen. 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: Redaktionelle Arbeiten und Ergänzungen des Teilberichtes AP1.4.

AP2: Planungsarbeiten abgeschlossen.

AP3: Eine Substitution des in der MgO-Betonrezeptur C3 enthaltenen Quarzmehles ist durch aufgemahlene NaCl Feinsalz (Körnung  $< 80 \mu\text{m}$ ,  $d_{50} = 10 \dots 20 \mu\text{m}$ ) möglich. Die Zugabemenge beträgt 2 kg aufgemahlene Feinsalz je kg MgO.

AP4: Aus dem Rückbau der In-situ-Bohrlochversuche zum Einbau von Bitumen und Asphalt im Ton wurden Proben aus dem Kontaktbereich gewonnen, die belegen, dass Bitumen auch in kleinere Risse in der Kontaktzone im Ton eingedrungen war sowie dass das Bitumen an der Kontur und am Schotterzuschlag der bitumenverfüllten Schotter säule bündig/lückenlos anschloss.

Mit den Proben aus dem Rückbau des zweiten Gesenkversuch zur Impulsverdichtung des Salzgrus-Ton-Gemisches mit ca. 7 % Friedländer Ton wurden erste Versuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit durchgeführt. Im Gefüge der verdichteten Salzgrus-Ton-Mischung sind keine auffälligen Wegsamkeiten festgestellt worden.

Der neue Versuchsort für den Großbohrlochversuch im Steinsalz hat ein Permeabilitätsniveau von  $\ll 10\text{-}18 \text{ m}^2$  und ist trocken (0,02 Ma.-% Lösungsgehalt). Die Auffahrung des Großbohrloches ( $D = 1,3 \text{ m}$ ) für den In-situ-Test eines Verschlusselementes aus MgO-Beton C3 wurde am neu gewählten Versuchsort begonnen. Messtechnik und die Konstruktionselemente der Druckkammer und der Kontrollkammer sind vorhanden.

Der Sandwich-Technikumsversuch HTV-5 mit einem neuen Bentonitgemisch aus Calcigel und einer Flüssigkeitsdruckbelastung von ca. 100 bar mit Pearson-Water wurde erfolgreich beendet und rückgebaut. Die durch den Rückbau ermittelte Feuchteverteilung im Bauwerk konnte mit den Messwerten der TDR-Sensoren korreliert werden. Die Wirkungsweise der Äquipotenzialsegmente und der Quelldruckaufbau in den Bentonitdichtsegmenten entsprachen den Erwartungen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Fortschreibung der Teilberichte.

AP2: Keine weiteren Arbeiten.

AP3: Versuche zur Qualitätskontrolle des MgO-Betons C3.

AP4: Abschluss der Arbeiten zum Einbau des Großbohrlochversuches zum Test eines Verschlusselementes aus MgO-Beton C3 im Steinsalz.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<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 31.08.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<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 Vergleichmäßigung 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

- AP1: Der Projektpartner IBeWa präsentierte im Berichtszeitraum die Ergebnisse der Modellrechnungen zu Strömungs- und Transportprozessen in Bentonitdichtelementen innerhalb eines Schachtverschlusses im Tongestein. Die Ergebnisse wurden zusammen

mit TU Freiberg und IfG in einem Fachgespräch diskutiert. Ziel war es, möglichen Anpassungsbedarf in den entwickelten Verschlusskonzepten zu identifizieren. Aus den Modellrechnungen zur Zweiphasenströmung und dem gewonnenen Prozessverständnis wird deutlich, dass durch den Aufbau der Schachtverschlüsse die Dichtwirkung gegenüber der Gasphase beeinflusst werden kann. Durch verschiedene Optimierungen ist sowohl eine erhöhte Dichtwirkung oder aber eine erhöhte Durchlässigkeit gegenüber der Gasphase möglich.

Die Schachtverschlusskonzepte für beide Referenzstandorte (Nord und Süd) wurden überarbeitet. Die Verschlussmodule innerhalb des Wirtsgesteins wurden hin zu einer erhöhten Dichtwirkung gegenüber der Gasphase modifiziert. Um eine möglichst zügige Aufsättigung der Bentonitelemente zu gewährleisten wurden Äquipotenzialsegmente berücksichtigt. Die Anteile von Bitumen/Asphaltelelementen im Schacht wurden erhöht. In den darüber liegenden Schachtteilen wurden weitere Dichtmodule zur Trennung aller Aquifere voneinander eingeführt.

- AP4: Die TU Freiberg stellte einen Kern aus dem zweiten Gesenkversuch in Marxgrün bereit. Der Kern umfasst mehrere Lagen. Aus jeder Lage wurde ein Dünnschliff, parallel zur Einbauschichtung, erstellt und ausgewertet. Zusätzlich wurde ein vertikaler Schliff erstellt. Wie bereits beim ersten Gesenkversuch, ist eine deutliche Lagenabhängigkeit der benetzten Bereiche zu erkennen. In der oberen Lage sind großflächige Benetzungen und Bahnen, entlang derer sich das Harz ausgebreitet hat, zuerkennen, häufig sind auch Kornrisse gefüllt. In der mittleren Lage ist ein verstärktes Auftreten von Bahnen entlang von Korngrenzen zu erkennen. In der unteren Lage sind vielfach trockene Bereiche zu erkennen. Im vertikalen Schliff lassen sich aber keine klaren Lagenübergänge erkennen. Die Probe scheint stark genau durchgewalkt zu sein, um Schichtgrenzen zu zerstören.
- AP5: Im Berichtszeitraum wurde an der angestrebten Verknüpfung zwischen dem partikelbasierten Code pfc und einer kontinuumsmechanischen Umgebung (FLAC) weitergearbeitet.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Anpassung der Verschlusskonzepte wird weitergeführt. Aufbauend auf den im Vorhaben und speziell AP5 gewonnenen Erkenntnissen soll eine erste Vordimensionierung der Dichtelemente erfolgen. Ziel ist es die benötigten Dichtlängen zu bestimmen und ein Konzept für den Umgang mit dem Schachtausbau zu beschreiben.
- AP5: Die Arbeiten zur Simulation von Schottersäulen mit Hilfe eines partikelbasierten Codes werden weitergeführt. Durch eine Verknüpfung der partikelbasierten Schottersäule mit einer kontinuumsmechanischen Umgebung soll die Anregungsfunktion eines Erdbebens realitätsnäher abgebildet werden.
- Die Arbeiten zum Bitumenstoffgesetz werden weitergeführt. Die von der TU Bergakademie bereitgestellten und ausgewerteten Messergebnisse werden zur Kalibrierung des Modellansatzes genutzt.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11243</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Langzeitsicherer Schachtverschluss im Salinar – Ergänzende laborative und modelltheoretische Untersuchungen zum HM-gekoppelten Rekompaktionsverhalten der EDZ (LASA-EDZ)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2013 bis 30.06.2018		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.065.602,50 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Czaikowski	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des Vorhabens LASA-EDZ besteht in der gezielten Bereitstellung von Labordaten für die hydro-mechanisch gekoppelte modelltheoretische Analyse des Langzeitdichtvermögens der Auflockerungszone im Bereich eines Schachtverschlusses für ein Endlager in Salzformationen. Hierzu sind die notwendigen Kenntnisse und Daten zum geomechanischen und geohydraulischen Materialverhalten auf der Grundlage von laborativen Untersuchungen zu ermitteln und im Hinblick auf einen fundierten Nachweis der Langzeitdichtfunktion zur Verfügung zu stellen.

Das Vorhaben wird in Kooperation mit dem Vorhaben LAVA 2 (Entwicklung chemisch-hydraulischer Modelle für die Prognose des Langzeitverhaltens von Salzbeton in Salzformationen) der GRS durchgeführt. Während im Projekt LASA die mechanisch-hydraulischen Eigenschaften im Vordergrund stehen, soll im Projekt LAVA-2 das System bezüglich chemisch-hydraulischer Prozesse untersucht werden. Die Beschreibungen der Einzelprozesse sollen langfristig in ein THMC-Modell zur Prognose des Langzeitverhaltens von Dichtbauwerken aus Salzbeton in Schacht- und Streckenverschlüssen einfließen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Experimentelle Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit im Autoklav (IST-Zustand der Proben), Ermittlung der Beziehung zwischen der Gasdurchlässigkeit und Minimalspannung während der Belastung in triaxialen Rekompaktionsversuchen, Ermittlung des Langzeitverhaltens der (trockenen/teilgesättigten) Steinsalzproben, bei Lösungszufluss (drainiert) und unter Lösungsdruck (undrainiert).
- AP2: Prozessanalytische Modellierung: Identifikation der bei Entnahme des Kernmaterials an der Entnahmelokation vorliegender Gebirgsbeanspruchungen, Auswahl geeigneter Stoffmodelle und Bestimmung der Stoffparameter für das HM-Verhalten der Auflockerungszone, Nachprüfung der Anwendbarkeit der bestehenden Salzmodelle bei Rekompaktion unter Feuchteeinfluss, Bestimmung der Stoffparameter aus den GRS-Laborversuchen, Kalibrierung und Validierung der ausgewählten Stoffmodelle durch Simulation typischer Laborversuche.
- AP3: Ergebniszusammenführung und Berichterstattung.



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

- Abschluss experimenteller Untersuchungen
- Durchführung orientierender modelltheoretischer Untersuchungen
- Erstellung des Abschlussberichts

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Erstellung der Druckversion des Abschlussberichts

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

Czaikowski, O., Hertel, U; Jantschik, K.; Wieczorek, K.: Hydro-mechanics in a seal/rock salt system. SALTMECH IX, Hannover 2018, - Review process -

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11284</b>	
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld (BIGBEN)			
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1			
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2014 bis 30.09.2018		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 707.450,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Kröhn	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Dampfdiffusionsmodell stellt die Sorptionsisotherme für Bentonit, die den empirischen Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Wassergehalt widerspiegelt, eine zentrale Zustandsgleichung dar. Bei der Beschreibung der Isotherme existieren zurzeit noch einige Unklarheiten. Dies betrifft vor allem den Temperatureinfluss auf die Isotherme, der in einem realen Buffersystem dadurch von Bedeutung ist, dass die Wiederaufsättigung in der thermischen Phase der Entwicklung eines Endlagers erfolgt. Die Wärmeentwicklung bewirkt im Inneren des Buffers auch ohne Wasseraufnahme von außen eine erhebliche Feuchtigkeitsumlagerung. Ferner ist noch unklar, welchen Einfluss die Hysterese zwischen Auf- und Entsättigung auf den Prozess der Wiederaufsättigung hat.

Diese Unklarheiten sollen durch Untersuchungen des Feuchteaufnahmevermögens unter Temperatureinfluss an tonhaltigen Dicht-/Versatzmaterialien, die noch genauer festzulegen sind (z. B. Calcigel, MX80, Febex-Material), beseitigt werden. Die ermittelten Ansätze für die Sorptionsisothermen werden im Code VIPER implementiert und deren Einsatzfähigkeit durch Modellrechnungen bestätigt.

Parallel dazu wird eine Rechenfallbibliothek einschließlich Dokumentation erstellt. Damit können nicht nur neue Programmversionen auch anhand älterer Modelle getestet werden. Vor allem erfolgt damit eine Überprüfung der älteren Modelle vor dem Hintergrund des im Laufe der Zeit stetig verbesserten und erweiterten Modellkonzepts.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Bei der Durchführung des Vorhabens werden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP1: Bestimmung von temperaturabhängigen Sorptionsisothermen
- AP2: Modellrechnungen mit neuen Sorptionsisothermen
- AP3: Erstellung einer systematischen Rechenfallbibliothek
- AP4: Erstellung des Abschlussberichts

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bestimmung von temperaturabhängigen Sorptionsisothermen im Ofen:

Das Sorptionsgleichgewicht bei den Bentonitproben unter unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten, die in Exsikkatoren über verschiedenen Salzlösungen platziert und in einem Wärmeschrank bei 30 °C gehalten worden waren, wurde im Berichtszeitraum erreicht. Damit wurden die Arbeiten an diesen Proben im Wärmeschrank abgeschlossen. Die gewonnenen Datenpunkte zeigen das erwartete Verhalten und konsistente Wassergehalte.

Messungen von Isothermen mit dem Vapour Sorption Analyzer (VSA):

Die VSA bietet zwei verschiedene Messverfahren zur Bestimmung von Isothermen an. Erste Messungen im letzten Jahr deuteten an, dass das wesentlich schnellere dynamische Verfahren, mit dem kontinuierliche Kurven ermittelt werden, gute Ergebnisse liefert. Eine genauere Analyse der zeitabhängigen Luftfeuchtigkeit und des damit verbundenen Wassergehalts zeigte jedoch, dass die Kurven wegen der relativ langen Dauer bis zum Erreichen des Gleichgewichts ungenau sind. Die diskreten Ergebnisse aus dem langwierigeren statischen Verfahren, welches explizit vorgegebene Gleichgewichtszustände ansteuert, sind daher den kontinuierlichen Kurven überlegen.

Durch Festlegung von geeigneten Adsorptions-Desorptionszyklen wurden die Scanlines sowohl für die Adsorption als auch für die Desorption sowohl für MX-80 als auch für Calcigel bei 25 °C aufgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im Rahmen der eingereichten Aufstockung und Verlängerung sollen bearbeitet werden:

- Integrierende Auswertung aller Isothermendaten für MX-80 und Calcigel.
- Fortsetzung der Messungen mit der VSA zur Bestimmung der Scanlines bei 55 °C.
- Herleitung geeigneter analytischer Funktionen zu deren Beschreibung.
- Modellierung einer generischen Aufsättigungssituation zur Untersuchung des Einflusses der neuen Isothermenfunktionen
- Aufnahme der Arbeiten zur systematischen Quantifizierung des Einflusses einer Einspannung der Bentonitproben auf die Mikrostruktur des Bentonits und den daraus resultierenden Verlauf der Isothermen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11294</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2014 bis 30.09.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.011.080,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Herold	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zielsetzung des Vorhabens ERNESTA ist es, die technische Umsetzung von Rückholungskonzepten weiter zu konkretisieren, sicherheitstechnische Konsequenzen und Auswirkungen der Sicherheitsanforderung „Rückholbarkeit“ auf die Endlagerauslegung weiter vertieft zu untersuchen und die Auswirkungen hinsichtlich Aufwand und Zeitbedarf aufzuzeigen. Die Planungen sollen Grundlagen für eine genehmigungsreife technische Lösung liefern.

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. Die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen ist Genehmigungsvoraussetzung für die Inbetriebnahme des Endlagers. Innerhalb des Vorhabens sollen zunächst allgemeine Fragestellungen zur Umsetzung und Implementierung der Rückholungsforderung für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente beantwortet werden. Im Anschluss erfolgt eine Weiterentwicklung und vertiefende Planung für eine mögliche Rückholung von Endlagerbehältern für das Konzept der Strecken- und Bohrlochlagerung im Salz- und Tongestein. Darüber hinaus werden Arbeitsprogramme zur Realisierung des Nachweises der technischen Machbarkeit für die relevanten Komponenten der Rückholungskonzepte erarbeitet.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konzeptübergreifende Fragestellungen und grundlegende Untersuchungen
- AP2: Planung von Rückholungskonzepten bei der Endlagerung im Salzgestein
- AP3: Planung von Rückholungskonzepten bei der Endlagerung im Tongestein
- AP4: Erarbeitung eines Umsetzungsplanes zur Durchführung möglicher Demonstrationsversuche
- AP5: Berichtswesen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2.4: Im Berichtszeitraum wurde die Auslegungsoptimierung der horizontalen Streckenlagerung im Salz weitergeführt.

Aus den durchgeführten Vergleichsrechnungen wurden vier Auslegungskonfigurationen ausgewählt. Eine Konfiguration mit verringerter Behälterbeladung zur Einhaltung des vorläufigen 100 °C Temperaturkriteriums nach StandAG und drei Konfigurationen als Optimierung der Bedingungen während der Rückholung. Zur Optimierung der Bedingungen während der Rückholung wird eine möglichst geringe Temperatur in der Rückholungsstrecke bei gleichzeitig möglichst guter Ausnutzung der Auslegungstemperatur angestrebt. Dafür wurde die maximale Beladung des Behälters bei veränderten Streckenabständen berücksichtigt. Für alle Varianten wurden die geomechanischen Bedingungen mit Hilfe numerischer Berechnungen überprüft. Die Konvergenzen in den Strecken sinken, wie erwartet, mit geringerer Umgebungstemperatur. Ein systematischer Ausbau als Kontursicherung ist in keiner der Varianten notwendig. Der benötigte Kühlaufwand zur Schaffung günstiger Wassertemperaturen wurde vor die einzelnen Vortriebe und für generische Modelle der berücksichtigten Konfigurationen ermittelt. Mit größer werdendem Streckenabstand sinkt der Kühlaufwand in den Einzelstrecken. Da die abgegebene Gesamtwärmemenge der Abfälle aber stets gleichbleibt, weisen die Grubengebäude im Ganzen in allen Varianten eine ähnliche Wärmebilanz auf.

AP2.5: Auf Basis des erstellten Anforderungskataloges wurde der Plateauwagen an die modifizierte Einlagerungsvorrichtung angepasst. Für den überarbeiteten Plateauwagen wurden tiefbauende und drehbargelagerte Fahrwerke berücksichtigt. In gleicher Bauweise wurden diese Fahrwerke bereits erfolgreich am Prototyp des Plateauwagens für den Transferbehälter der Brennstabkockille eingesetzt. Der neue Oberwagen besteht aus einer geteilten Oberschale. Ein Teil der Schale fasst den Behälter über die halbe Mantelfläche und an einer Stirnseite. In den anderen Bereichen liegt die Seitenwand tiefer, um ein Eingreifen der Greifzangen zu ermöglichen. Zur Beurteilung der Kippgefahr wurden erste Berechnungen durchgeführt. Der überarbeitete Aufbau erlaubt einen sicheren Betrieb.

Für die modifizierte Einlagerungsvorrichtung wurde eine Betriebsstörungsanalyse durchgeführt. Im Rahmen der Analyse wurden alle wesentlichen Baugruppen der mELVIS berücksichtigt. Im Vordergrund der Analyse stand der Arbeitsablauf während der Rückholung. Dabei nimmt die Vorrichtung den Behälter auf, verfährt gleislos aus der Rückholungsstrecke bis an die Übergabestelle im Querschlag und legt den Behälter auf dem Plateauwagen ab. Der umgekehrte Arbeitsablauf, wie er für eine gleislose Einlagerung notwendig wäre, wurde ebenfalls beschrieben.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP5: Die Projektergebnisse des Vorhabens werden in je einem Teilbericht zu jeder Einlagerungs- bzw. Rückholungsvariante dokumentiert. Zusätzlich werden die Ergebnisse aller APs in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

P. Herold, W. Filbert: Weiterentwicklung erprobter Transport- und Einlagerungstechniken für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle im Zuge veränderter Sicherheitsanforderungen, 8. Kolloquium "Fördertechnik im Bergbau" 2018, Clausthal-Zellerfeld, 31.01./01.02.2018

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11304</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Tonforschung im Untertagelabor Mont-Terri	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2014 bis 30.06.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.560.517,33 EUR	<b>Projektleiter:</b> Wieczorek

## 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 Arbeiten dienen dem Ziel, das Verständnis der in einem Endlagersystem im Tonstein ablaufenden Prozesse weiterzuentwickeln sowie die Stoffmodelle und numerischen Simulationsprogramme zu qualifizieren. Für diesen Zweck werden auch relevante Daten ermittelt. Die Untersuchungen betreffen vor allem Fragestellungen bezüglich des THM-Verhaltens des Tonsteins, der Auflockerungszone und von tonhaltigen Buffer- bzw. Verschlussmaterialien. Durch die Arbeit in Gemeinschaftsprojekten mit internationalen Partnern wird der Aufwand reduziert und der Erkenntnisgewinn maximiert.

Die Ergebnisse des Projekts werden direkten Einfluss auf die Konzeption und -auslegung eines Endlagers im Tonstein haben und ergänzen damit die Arbeiten des Projekts AnSichT.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: FE Experiment – Porendruckmessungen und Modellrechnungen als Beitrag zum Streckenlagerexperiment 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 und BGR)
- AP3: DM-A Experiment – Langzeitverformungsmessung des Tonsteins in einem Bohrloch
- AP4: SB-A Experiment – Untersuchung von Bohrlochabdichtung und Auflockerungszone (mit BGR)
- AP5: DB Experiment – Messung von Porendruckverlauf sowie chemischem und thermischem Potential im ungestörten Tonstein in einem tiefen Bohrloch durch die Opalinuston-Formation (mit Swisstopo, IRSN, NWMO, NAGRA und BGR)
- AP6: LT-A Experiment – Eigenschaften der sandigen Fazies: Modellkalibrierung an Hand von Laborexperimenten (mit BGR)
- AP7: Weiterentwicklung von VIRTUS für den Einsatz in Tonstein
- AP8: Mine-By Experiment (MB-A) in der sandigen Fazies (mit BGR und Swisstopo)
- AP9: Technical und Steering Meetings

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Messungen des Porendrucks in der Umgebung des FE-Tunnels dauern an und liefern aussagekräftige Ergebnisse. Die Ergänzung des dreidimensionalen Finite-Element-Modells des FE Experiments um die Spritzbetonauskleidung ist erfolgt, die Modellierung steht noch aus.
- AP2: Der HE-E Versuch wurde störungsfrei weitergeführt. Der Buffer im zentralen und erhitzernahen Bereich ist immer noch entsättigt, und der tunnelnahe Gebirgsbereich steht noch unter Saugspannung. Thermisch-hydraulisch gekoppelte Simulationen mit Code\_Bright mit realistischer und detaillierter 3D-Geometrie wurden durchgeführt und im Februar bei „Messen in der Geotechnik“ präsentiert.
- AP3: Seit 2009 werden mit einer in einem horizontalen Bohrloch eingebauten Dilatometersonde die Langzeitverformung des Bohrlochquerschnitts sowie ergänzend Temperatur und Luftfeuchte gemessen. Es ist weiterhin eine stetige, nahezu stationäre Bohrlochkonvergenz messbar.
- AP4 und AP5 sind abgeschlossen.
- AP6: Die langzeitigen Kriechversuche an fünf Proben aus der sandigen und karbonatreichen Fazies der OPA-Tonformation und der oberen karbonatreichen COX-Tonformation bei unterschiedlichen triaxialen Spannungen laufen seit über einem Jahr erfolgreich. Eine Fortsetzung der Versuche für weitere 2–3 Jahre ist geplant. Verheilungsversuche mit drei künstlich geschädigten Proben aus dem sandigen OPA-Tonstein laufen ebenfalls seit mehr als einem Jahr, wobei die Wasserdurchlässigkeit jeder Probe bei erhöhten Druckspannungen gemessen wird.
- AP7: Das neue detaillierte Modell der Mont Terri Geologie wurde in VIRTUS übernommen.
- AP8: Vier der fünf geplanten Bohrlöcher zur Porenwasserdruckmessung im Mine-by Experiment wurden im Juni erbohrt und instrumentiert. Die Erstellung und Instrumentierung des letzten Bohrlochs, die Verfüllung der Resträume in den Bohrlöchern und der Messbeginn sind für August/September 2018 geplant.
- AP9: Teilnahme am Technical Meeting im Februar 2018 und an den Steering Meetings im März und im Mai 2018.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Weiterführung der Messungen in den laufenden Experimenten
- THM-Simulation der Aufheizphase im FE Experiment (unter Einsatz von VIRTUS)
- 3D-Modellierung (THM) des HE-E
- Modellierung der Bohrlochverformung in DM-A mit viskosen Ansätzen
- Fortsetzung der Laborexperimente zur Ermittlung der triaxialen Kompression- und Extensivverhalten des sandigen OPA-Tonsteins
- Vervollständigung der Instrumentierung und Messbeginn im Mine-By Experiment

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Friedenberg, L., K. Wiczorek, O. Czaikowski (2018): Drei-dimensionale Simulation des im Felslabor Mont Terri (Schweiz) durchgeführten HE-E Erhitzer-Experiments, Messen in der Geotechnik 2018, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 104, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11314</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Ermittlung der Stabilitätsbandbreiten redoxdeterminierender eisenhaltiger Korrosionsphasen (KORPHA)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2014 bis 30.11.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 666.350,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hagemann	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

- Identifizierung von Behälterkorrosionsphasen, mit denen in einem Endlager in einer norddeutschen Tonformation zu rechnen ist.
- Synthese und thermodynamische Charakterisierung von Behälterkorrosionsphasen.
- Ableitung des korrosionsdeterminierten Redoxniveaus im Nahfeld eines Endlagers in einer norddeutschen Tonformation und Prüfung der Auswirkung auf den Transport von Radionukliden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Aufbauend auf einer kritischen Bewertung experimenteller Daten zur Korrosion von Behälterstahlmaterialien werden Korrosionsphasen ermittelt, die in einem Endlager in einer norddeutschen Unterkreide-Tonformation auftreten könnten.
- Die zuvor identifizierten Korrosionsphasen werden mit verschiedenen Methoden gezielt synthetisiert. Mit den erhaltenen Verbindungen wie auch anderen kommerziell erhältlichen oder von anderen Arbeitsgruppen hergestellten Präparaten werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um ihre thermodynamische Stabilität zu ermitteln.
- Auf Grundlage der Erkenntnisse sowie weiterer bekannter Randbedingungen wird die mögliche Bandbreite des Redoxniveaus in einem Endlager in einer norddeutschen Unterkreide-Tonformation modellhaft ermittelt. Mit Hilfe von Stofftransportmodellen wird gezeigt, wie sich die Variabilität des Redoxniveaus auf die Konzentration der Radionuklide entlang des Ausbreitungspfades im einschlusswirksamen Gebirgsbereich auswirkt.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zur Prüfung der Frage, ob sich neben Fe-Hibbingit –  $\text{Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$  noch weitere stabile Fe(II)-Hydroxychloride bilden, wurden durch Versuche bei hohen pH-Werten oder Chloridgehalten weiter geprüft. Die unter diesen Bedingungen gefundenen Phasen konnten durch Röntgenanalyse stets Fe-Hibbingit oder Fe(II)-Hydroxid zugeordnet werden.

Versuche zur Synthese von Fe-Northupit (Analogon zu  $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$ ), und von Fe-Kambaldait (Analogon zu  $\text{Na}_2\text{Ni}_8(\text{CO}_3)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) führten ebenfalls nicht zu diesen Analoga, sondern zu Chukanovit oder zu Siderit. Zumindest bei Kambaldait ist aber aufgrund der Existenz eines Co-Analogons davon auszugehen, dass sich unter geeigneten Bedingungen auch eine Fe(II)-Verbindung zumindest metastabil bildet.

Die Versuche zur Synthese von Amakinit,  $(\text{Fe},\text{Mg})(\text{OH})_2$  führten zu homogenen Präparaten mit einem Fe-Mg-Mischungsverhältnis zwischen 1:0 und 0:1. Jedoch waren die Magnesiumkonzentrationen in den Gleichgewichtslösungen für eine Analyse zu klein. Es wurde daher eine neue Messreihe angesetzt, die zu einem deutlich niedrigeren pH und damit höheren Mg- und Fe-Gehalten führen sollte.

Versuche zur Bildung von Mischphasen mit Ca sowie Langzeitversuche zur Bildung von grobkristallinen Fe(II)-Hydroxidphasen wurden fortgesetzt und stehen vor der Analyse. Es wurden außerdem Syntheseveruche für einen Chlorid-Green Rust begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Abschluss der Synthesen von Fe(II)-haltigen Phasen. Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Löslichkeitskonstante von Chukanovit und Fe-Hibbingit bei 40 und 60 °C.

Berechnung möglicher Bandbreiten des Redoxniveaus in salinaren Lösungen eines Endlagers bei gleichzeitiger Eisenkorrosion.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11324</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Entwicklung eines chemisch-hydraulischen Modells für die Prognose des Langzeitverhaltens von Salzbeton in Salzformationen (LAVA-2)	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2014 bis 31.03.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 31.03.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 771.673,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Moog

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen von LAVA-2 wird ein Modell entwickelt und experimentell abgesichert, mit dem die veränderliche Permeabilität eines Dichtbauwerks aus Salzbeton in Schacht- und Streckenverschlüssen in Salzformationen infolge der Korrosion durch Salzlösungen zeit- und ortsabhängig beschrieben werden kann. Das Modell soll die diffusionsbestimmte Korrosion durch die geringpermeable störungsfreie Salzbeton-Matrix ebenso beschreiben, wie die Korrosion auf Rissen und Kontaktfugen Dichtbauwerk-Salzgebirge.

Das Vorhaben wird in Kooperation mit dem Vorhaben LASA (Langzeitsicherer Schachtverschluss im Salinar) der GRS durchgeführt. Während im Projekt LASA die mechanisch-hydraulischen Eigenschaften im Vordergrund stehen, soll im Projekt LAVA-2 das System bezüglich chemisch-hydraulischer Prozesse untersucht werden. Die Beschreibungen der Einzelprozesse sollen langfristig in ein THMC-Modell zur Prognose des Langzeitverhaltens von Dichtbauwerken aus Salzbeton in Schacht- und Streckenverschlüssen einfließen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

### AP1: Laborversuche

AP1.1: Präparation der Salzbetonproben und der Korrosionslösungen

AP1.2: Ermittlung von Materialkenngrößen des unkorrodierten Salzbetons

AP1.3: Kaskadenversuche, Versuche zur Ermittlung des Reaktionspfades der Korrosion mit NaCl- und IP21-Lösung

AP1.4: Vorbereitung der Versuchsreihen

AP1.5: Durchführung der Versuchsreihen

AP1.6: Probenahme und Messungen: Matrixproben, Schnittflächen- und Kontaktflächenproben

AP1.7: Auswertung der Messdaten

### AP2: Modelltheoretische Arbeiten

AP2.1: Bereitstellung der thermodynamischen Daten

AP2.2: Test und Anpassung eines reaktiven Stofftransportmodells zur Beschreibung des diffusions- und advektiv bestimmten Lösungsangriffs auf die poröse Matrix von Salzbeton

AP2.3: Test des reaktiven Stofftransportmodells zur Beschreibung diskreter Risse

AP3: Simulationsrechnungen

AP3.1: Geochemische Gleichgewichtsmodellierung der Kaskadenversuche

AP3.2: Modelltheoretische Betrachtung der Diffusions- sowie Advektionsversuche

AP3.3: Modelltheoretische Betrachtungen der Schnittflächen- und Kontaktflächenversuche mit diskreten Rissen

AP4: Dokumentation der Ergebnisse und Abschlussbericht

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

Erstellung des Abschlussberichtes.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine.

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

Jantschik, K. (2018): Investigation of diffusive and advective induced corrosion behaviour of cement-based sealing materials in rock salt, SaltMech IX 2018, Hannover (eingereicht)

Kyra Jantschik, Johannes Kulenkampff, Helge C. Moog (2018): Investigation of the flow along the contact seam between salt cement and rock salt, SaltMech IX 2018, Hannover (eingereicht)

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11334A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt A	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2014 bis 30.11.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 848.318,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Muñoz

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Projektes EDUKEM ist die Gewinnung abgesicherter Daten zur Speziation und zu den Löslichkeitsgrenzen von Uran (IV/VI) in verdünnten bis hochsalinaren Lösungen flankiert von methodischen Weiterentwicklungen.

Das Ziel des GRS-Teilprojekts EDUKEM ist die Entwicklung neuartiger elektrochemischer Methoden zur Bestimmung der Speziation von U(IV) und U(VI) in komplexen hochsalinaren Lösungen und zur Gewinnung der entsprechenden thermodynamischen Daten. Dieses Ziel wird in zwei Phasen erreicht. In der ersten Phase werden Nieder- und Hochfrequenzmethoden zur Messung der Ionen-Mobilität in hochsalinaren Milieus entwickelt. Die gewonnenen Daten werden in der zweiten Projektphase für die Auswertung der geplanten potentiometrischen Experimente in Uran-Systemen angewandt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Aufbau des experimentellen Messplatzes
- AP2: Durchführung von experimentellen Messungen der Ionen-Mobilität
- AP3: Auswertung der experimentellen Daten und systematische Darstellung der Ionen-Mobilität durch die MSA-Theorie
- AP4: Durchführung der potentiometrischen Messungen
- AP5: Koordination des Verbundvorhabens
- AP6: Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3: Auswertung der experimentellen Impedanz-Messungen  
Wie im letzten Bericht mitgeteilt, konnten die experimentelle Impedanz-Ergebnisse durch die Lösung der Transportgleichungen für zwei Ionen erfolgreich beschrieben werden. Dieses Modell beinhaltet vier Transportgröße, den Diffusionskoeffizienten und die Mobilität des jeweiligen Ions. Durch eine weitere Einsicht in die theoretischen Grundlagen konnte man die durch den Transport entstandene Impedanz mit einem seriellen RC-Ersatzschaltbild verbinden, wobei die Kapazität eine direkte Funktion der Überföhrungszahl ist. Darüber hinaus konnte man durch einen direkten Vergleich der Transportgleichungen für verdünnte und konzentrierte Elektrolyten, eine Verbindung

zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Mobilität herausfinden. Damit reduziert sich die Zahl der Parameter von vier zu einem einzigen Parameter: der Überföhrungszahl. Das kann man als die Vollbringung eines Meilensteins dieses Projektes betrachten, nämlich die direkte Messung von Überföhrungszahlen mittels Impedanz.

**AP3: Auswertung der experimentellen TDR**

Aus der Auswertung der dielektrischen Spektren konnte man die Konzentrationsabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante gewinnen, die als Konstante in den Auswertungsgleichungen der Impedanzmethode auftauchen. Andere interessante Aspekte wie die Ionenassoziation und die Hydratationszahl konnten aus den Spektren abgeleitet werden. All diese Aspekte, sowohl von akademischer als auch praktischer Relevanz, werden in der vom Projekt geförderten Dissertation ausführlich diskutiert.

**AP4: Durchführung von Potentiometrischen Messungen**

Die in 2016 angefangenen U(IV)/U(VI) Redox-Experimente wurden fortgesetzt. Zunächst wurde das Redox-Verhalten des Systems U(IV)/U(VI) in 0.1 M HCl mittels elektrochemischen Impedanz vervollständigt. Damit wird erwartet, eine bessere Einsicht in die Grenzflächenprozesse zu schaffen, die helfen, den Redoxmechanismus zu bestimmen. Ein ähnliches Messprogramm wurde im U(IV)/U(VI)-Redoxsystem in konzentriertem MgCl<sub>2</sub>-Lösungen durchgeführt.

**AP5: Betreuung des Doktoranden**

Die Leitfäden zu Erstellung der Doktorarbeit wurden durch mehrere Gespräche mit dem Doktoranden bereits definiert. Der Schreibprozess verzögert sich aber durch die jetzige Beschäftigungssituation des Doktoranden.

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

- Vervollständigung des geplanten Programms zur Redox-Messungen am HZDR
- Auswertung der Redox-Messungen
- Erstellung des Endberichtes

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

Die im Rahmen dieses Projektes entstanden Ergebnisse werden in internationalen Journalen publiziert

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11334B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2014 bis 30.11.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 259.275,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Steudtner	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt EDUKEM (Partner: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig und Institut für Nukleare Entsorgung, Karlsruhe Institut für Technologie) setzt neuartige komplementäre Ansätze zur Analyse der Uranspeziation um, welche durch die hohe chemische Komplexität uranhaltiger Lösungen im salinaren Milieu erforderlich sind. Uran bildet im reduzierenden wie auch im oxidierenden Milieu eine Vielzahl von Komplexen, welche oft gleichzeitig und in stark unterschiedlichen Konzentrationen in Lösung vorliegen. Zudem ist für die thermodynamische Beschreibung der Chemie in hochsalinaren Lösungen die Kenntnis ionenspezifischer Wechselwirkungsparameter (Pitzer-Parameter) zwingend erforderlich, um über Aktivitätskoeffizienten eine zuverlässige Einschätzung von Ionenstärkeeffekten auf Löslichkeit und Speziation zu ermöglichen. Die Bestimmung von Pitzer-Parametern mit klassischen Methoden, wie Löslichkeitsexperimenten und spektroskopischen Untersuchungen, soll hier durch alternative elektrochemische Verfahren unterstützt werden. Die Ergebnisse sollen zum Abbau von Unsicherheiten und Konservativitäten bei der Berechnung der Speziation und Löslichkeitsgrenzen von Uran (IV/VI) in hochsalinaren Lösungen führen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Elektrochemische Messungen (GRS)
- AP2: Löslichkeit relevanter U(IV) und U(VI) Phasen (KIT-INE)
- AP3: Spektroskopische Untersuchungen (HZDR-IRE)
- AP3.1: Spektroskopische Charakterisierung von Uran(IV/VI)-Mineral- und -Sekundärphasen
- AP3.2: Spektroskopische Charakterisierung von Uran(IV/VI) in ausgewählten hochsalinaren Lösungen
- AP3.3: Spektroskopische Untersuchungen an Gleichgewichtslösungen
- AP3.4: Ableitung thermodynamischer Parameter
- AP4: Entwicklung eines thermodynamischen Modells für U(VI) (GRS, KIT-INE, HZDR-IRE)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP3.2:

- Erstellung der Publikation zum Einfluss von Sulfat auf die U(IV)-Speziation
- Durchführung von U(VI)-Speziationsuntersuchungen im U(VI)-Chlorid-System bei einer Ionenstärke von 3 M mittels TRLFS bei tiefen Temperaturen – Bestimmung der Fluoreszenzeigenschaften und Ableitung thermodynamischer Daten
- Untersuchung des Einflusses der Parameter pH-Wert, Temperatur und Ionenstärke auf die Fluoreszenzeigenschaften des freien Uranyl(VI) Ions. Dafür wurden Anregungs-/Emissionsscan aufgenommen

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP3.2:

- Einreichung der Publikation zum Einfluss von Sulfat auf die U(IV)-Speziation.
- Weiterführende Untersuchungen zum Einflusses der Parameter pH-Wert, Temperatur und Ionenstärke auf die Fluoreszenzeigenschaften des freien Uranyl(VI) Ions
- Wellenlängenabhängige TRLFS für U(IV)-Speziationsuntersuchungen am Sulfat-System bei Tieftemperatur, Abhängigkeit der Lebenszeit von der Temperatur und Einfluss der Anregungswellenlänge auf das Lumineszenzverhalten
- Untersuchung der Löslichkeit von Uran(IV) in endlagerrelevanten Gruben- und Porenwässern
- Bestimmung der Uran(IV)-Speziation in endlagerrelevanten Gruben- und Porenwässern

AP3.4:

- Bestimmung der Uran(IV)-Löslichkeitsprodukte in endlagerrelevanten Gruben- und Porenwässern

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

T. Zimmermann, R. Steudtner, S. Lehmann, V. Brendler: Temperature dependency of the uranium(IV) fluorescence. Annual Report 2017 Institute of Resource Ecology, Wissenschaftlich-Technische Berichte HZDR-085, 2018

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11344A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt A	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2015 bis 28.02.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 858.857,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Meleshyn

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Ziele des Verbundvorhabens bestehen in der Entwicklung abgesicherter, objektiver Kriterien zur Auswahl geeigneter Bentonite für den Einsatz in Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle. Das Hauptziel des Projektes ist es, den Umwandlungsmechanismus von Bentoniten als Funktion von Lösungszusammensetzung, Temperatur und mikrobieller Aktivität anhand von Laborversuchen aufzuklären. Konkret soll festgestellt werden, ob diese Einflüsse zu Änderungen des Fe(III)-Gehalts der reagierten Bentonite bzw. zu Änderungen des Quelldrucks und der Lösungspermeabilität von hochkompaktierten Bentoniten führen.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Diese Aufklärung soll im Projekt anhand der Untersuchungen von 15 Bentoniten erfolgen, die mit einer auf den für die Endlagertiefe in der Unterkreidetonformation in Norddeutschland erwarteten Salzgehalt von 150 g/L verdünnten Gipshutlösung und der Opalinustonporenlösung bei 25 °C, 60 °C, 90 °C und 120 °C ein und zwei Jahre reagieren werden.

Die durch die Reaktion veränderten Quelldruck und Permeabilität – sowie der Fe(II)/Fe(III)-Gehalt für mikrobielle Versuche – der Bentonite und die Hauptionkonzentrationen der reagierten Lösungen sollen erfasst werden.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden 18 von insgesamt geplanten 84 Quelldruck- und Permeabilitätsversuchen, die am 7. Juni 2017 gestartet wurden, im Mai abgeschlossen. Zwei Versuche laufen nach, da in einem Fall bei verwendetem Pumpendruck von 1 bar keine Lösung durch die Probe durchdringt und ein höherer Lösungsdruck mit einer separaten Pumpe angewendet wird. Im zweiten Fall wurden noch keine stabilen Permeabilitätswerte erreicht. Für den Abschluss dieser beiden Versuche werden noch voraussichtlich etwa zwei Monate gebraucht. Mit den frei gewordenen 18 Messzellen werden in der derzeit vorbereiteten, nächsten Messkampagne die wichtigsten für die Auswertung der Projektergebnisse Proben (bei 90 °C) untersucht.

Es wurden die restlichen 47 Batches, die bei 25, 60 und 90 °C zwei Jahre und bei 120 °C ein Jahr reagiert haben, Anfang Februar gemeinsam mit den Verbundprojektpartnern aus Rossendorf und Greifswald beprobt. Somit wurden alle geplanten Batches im Projekt beendet.

Die restlichen ICP-OES und Dichtemessungen der reagierten Lösungen wurden durchgeführt. Somit wurden alle geplanten ICP-OES und Dichtemessungen im Projekt abgeschlossen.

Die Messungen der Wasseraufnahmekurve der untersuchten Bentonite in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bei 94 % dauert wegen der langsamen Gleichgewichtseinstellung noch an.

Die Messungen des Fe(II)/Fe(III)-Gehaltes für die Bentonitproben aus mikrobiellen Versuchen werden derzeit durchgeführt und im nächsten Halbjahr abgeschlossen.

Die Karbonatbombe-Messungen der Karbonatgehalte in Bentoniten, die bei 120 °C und exemplarisch bei 25 °C und 90 °C reagiert haben, wurden durchgeführt.

Zwei Messreihen zur Aufklärung der Mechanismen der Gasfreisetzung in Bentoniten bei 120 °C wurden beendet und die Gasanalysen durchgeführt. Zwei letzte Messreihen wurden gestartet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Die Quelldruck- und Permeabilitätsmessungen der bei 90 °C zwei Jahre reagierten Bentonite werden gestartet.
- Die Messungen des Fe(II)/Fe(III)-Gehaltes für reagierte Bentonitproben aus mikrobiellen Versuchen mit einer zweijährigen Reaktionszeit werden fortgesetzt.
- Die Messungen der Wasseraufnahmekurve der untersuchten Bentonite in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte werden fortgesetzt.
- Versuche zur Aufklärung der Mechanismen der Gasfreisetzung in Bentoniten bei 120 °C werden fortgesetzt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11344B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2015 bis 31.12.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 300.296,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Arnold	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung abgesicherter, objektiver Kriterien zur Auswahl geeigneter Bentonite für den Einsatz in Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle in Tonformationen. Die konkreten Ziele dieses Vorhabens sind: (1) Aufklärung des Lösungs- und Umwandlungsmechanismus von Smektiten (basierend auf dem GRS-Vorhaben „Fe-Bentonit“ und dem BGR Projekt „idealer Bentonit“) als Funktion von Lösungszusammensetzung und Temperatur anhand von Laborversuchen, optimierter Analytik und quantenmechanischer Modellrechnungen; (2) Identifizierung der Prozesse, die bei unterschiedlichen Bentoniten zu unterschiedlichen Reaktivitäten (Langzeitverhalten) führen; (3) Korrelierung der chemisch-mineralogischen Veränderungen der kompaktierten Bentonite mit Änderungen der hydraulischen Eigenschaften (Quelldruck und Permeabilität); (4) Untersuchungen zum Einfluss von Bakterien auf die Bentonitumwandlung; (5) Erläuterung der Rolle der Löslichkeit von Smektiten hinsichtlich der Fe-Korrosion und (6) Ableitung von Kriterien zur Auswahl optimal geeigneter Bentonite für den Einsatz in Endlagern.

Bisher ist es nicht hinreichend zuverlässig gelungen, alle relevanten experimentellen Daten zum Langzeitverhalten von Bentoniten im Kontakt zu Lösungen unter Endlagerbedingungen mit einem einheitlich abgesicherten Modell zu erklären. Eine Unsicherheit liefert in diesem Zusammenhang die Mikrobiologie. Reaktionen, die abiotisch nicht stattfinden, sind im Kontakt mit Mikroben möglicherweise als relevant anzusehen, da Mikroben spezielle Reaktionen katalysieren können.

Durch ein experimentelles und modelltheoretisches Arbeitsprogramm sollen Lücken im Prozessverständnis der Bentonitumwandlung im Kontakt zu Formationslösungen geschlossen werden. In dem hier vorgeschlagenen Vorhaben sollen zum ersten Mal vier in der Bentonitforschung ausgewiesene nationale Arbeitsgruppen zusammenarbeiten. Zum Erreichen der oben genannten Ziele sind aufeinander abgestimmte experimentelle und analytische Arbeiten in den Laboren der GRS, der Universität Greifswald und des HZDR vorgesehen. Dafür stellt die BGR 40 unterschiedliche, gut charakterisierte Bentonite zur Verfügung, von denen 15 von der GRS auf ihre hydromechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen untersucht werden. Zwei Bentonitproben werden mit Nährsubstraten in den Lösungen durchgeführt, um Informationen über eine mögliche Beteiligung von Bakterien an Mineralumwandlungen zu belegen oder auszuschließen.

Innerhalb der Kooperationspartner (Förderkennzeichen 02E11344): Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Abteilung Sicherheitsanalysen, Bereich Endlagersicherheitsforschung, Braunschweig; Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Institut für Geographie und Geologie, Greifswald; Technische Universität München, Theoretische Chemie.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP7.1.2: Einfluss von mikrobiellen Prozessen auf die Bentonitumwandlung

- Bestimmung der Zellzahl bzw. Zelldichte
- Bestimmung der mikrobiellen Diversität

- Real Time Quantitative PCR (oder Q-PCR)
- Kultivierung von Mikroorganismen auf geeigneten Nährmedien
- Catalyzed Reporter Deposition Fluorescence In-Situ-Hybridization (CARD-FISH)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Am HZDR wird der Einfluss verschiedener Parameter auf die Entwicklung der mikrobiellen Diversität in den Bentoniten B36 und SD80 analysiert. Die Bentonite wurden hierfür bei der GRS mit Opalinuston-Porenlösung bzw. verdünnter Gipshut-Lösung versehen. Zu den mikrobiellen Ansätzen wurden zusätzlich Substrate gegeben (50 mM Laktat, 50 mM Azetat, 1 mM Methanol, 0,1 mM AQDS). Die insgesamt 48 Ansätze inkubierten in gasdichten Glasflaschen bei 25 °C, 60 °C und 90 °C für ein bzw. zwei Jahre.

Die Proben aller Ansätze wurden erfolgreich bei der GRS in Braunschweig entnommen. Von den 48 zu analysierenden, mikrobiellen Proben, konnte aus 44 Ansätzen die DNA erfolgreich isoliert werden. Eine Amplifikation der 16S rDNA sowie deren Sequenzierung wurde bereits für 10 Proben durchgeführt (einschließlich der Ausgangs-Bentonite). Hier zeigten sich auffällige Veränderungen bei den mit substrathaltiger Opalinuston-Porenlösung versehenen SD80-Ansätzen. Die entsprechenden Ansätze zeigten sowohl nach einem Jahr als auch nach zwei Jahren Inkubation bei 25 °C eine deutliche Dominanz von Sulfat-reduzierenden Mikroorganismen der Gattungen *Desulfosporosinus*, *Desulfitobacterium* und *Desulfotomaculum* – Bakterien, welche nicht im SD80-Ausgangsmaterial nachgewiesen werden konnten. Die mikrobielle Diversität hat sich innerhalb der betrachteten Zeiträume demnach stark verändert. Die drei erwähnten Gattungen nutzen Sulfat als Elektronen-Akzeptor, was einhergeht mit der Bildung von sulfidischen Verbindungen wie beispielsweise Schwefelwasserstoff. In den jeweiligen Ansätzen konnte auch die Bildung von schwerlöslichen, schwarzen Eisensulfiden beobachtet werden, welche sich sehr wahrscheinlich als Resultat der mikrobiellen Aktivität gebildet haben. Zudem sind einige Arten der erwähnten Gattungen Sporenbildner, was die jeweiligen Mikroorganismen in die Lage versetzt auch unter sehr harschen Bedingungen (Hitze, Trockenheit, Nährstoff-Knappheit) über große Zeiträume zu überdauern bis die Bedingungen wieder optimal sind.

Weiterhin konnte in einer der B36-Proben, die mit Opalinuston-Porenlösung versehen war und für zwei Jahre bei 60 °C inkubierte, die DNA der Gattung *Symbiobacterium* nachgewiesen werden. Mit über 70 % war diese Gattung in der betreffenden Probe nachzuweisen. Zu dieser Gattung zählen thermophile Vertreter, welche bei 60 °C optimales Wachstum zeigen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Von den noch verbliebenen vier Ansätzen soll die DNA isoliert und amplifiziert. Des Weiteren wird versucht die Amplifikation bereits isolierter DNA zu optimieren.

Die entnommenen Porenlösungen aus den jeweiligen Ansätzen inkubieren bei den entsprechenden Temperaturen. Die Lösungen sollen genutzt werden, um entsprechende Medien zu beimpfen und bestimmte Mikroorganismen (Sulfat-Reduzierer, Eisen-Reduzierer) anzureichern.

Die erhaltenen Daten werden zusammenfassend im Abschlussbericht des UMB-Projektes dargestellt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Die mikrobiellen Ergebnisse des UMB-Projektes wurden im Jahresbericht 2017 des Instituts für Ressourcenökologie unter dem Titel „Evolution of microbial diversity in bentonite-microcosms“ mit den Autoren N. Matschiavelli, S. Kluge, V. Prause, A. Meleshyn und A. Cherkouk veröffentlicht.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Domstr. 11, 17489 Greifswald		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11344C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2015 bis 31.12.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 198.054,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Warr	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens sind Beiträge zur

- Aufklärung des Lösungs- und Umwandlungsmechanismus von Smektiten (basierend auf dem GRS-Vorhaben „Fe-Bentonit“) als Funktion von Lösungszusammensetzung und Temperatur anhand von Laborversuchen, optimierter Analytik und quantenmechanischer Modellrechnungen
- Identifizierung der Prozesse, die bei unterschiedlichen Bentoniten zu unterschiedlichen Reaktivitäten (Langzeitverhalten) führen
- Korrelierung der chemisch-mineralogischen Veränderungen der kompaktierten Bentonite
- Untersuchungen zum Einfluss von Bakterien auf die Bentonitumwandlung
- Erläuterung der Rolle der Löslichkeit von Smektiten hinsichtlich der Fe-Korrosion
- Ableitung von Kriterien zur Auswahl optimal geeigneter Bentonite für den Einsatz in Endlagern.

Das Forschungsvorhaben erfolgt in Kooperation mit den Förderprojekten 02E11344A und 02E11344B.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Analytik der Originalproben (XRD, TEM, CEC)
- AP2: Natürliches Analogon: Beprobung & Analytik
- AP3: Natürliches Analogon: Saponit/Experimente
- AP4: Vorversuche für mineralogische Analytik
- AP5: Vorversuche für Elektronen-Mikroskopie
- AP6: Natürliches Analogon: Saponit/Analytik
- AP7: Natürliches Analogon: Experimente & Analytik
- AP8: Analytik der GRS Reaktionsprodukte
- AP9: Auswertung (Mechanismen)
- AP10: Berichte

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die 1-Jahresreihe der mit Substrat versetzten Proben (B36, SD80) und derer Kontrollen zur Bestimmung des Einflusses mikrobieller Aktivität auf die mineralogischen und chemischen Eigenschaften der Bentonite wurden detailliert ausgewertet. Neben dem qualitativen und quantitativen Mineralgehalt wurde auch die Kationenaustauschkapazität (KAK) bestimmt. Beide Bentonite un-

terscheiden sich zunächst in ihrer mineralogischen Zusammensetzung und dem Anteil quellfähiger Tonminerale. So besitzt die Probe SD80 einen Smektitanteil von ca. 90 % und B36 um 70 %. Die XRD Ergebnisse der Kontrollbatches (ohne Substrat) zeigen keine Mineralneubildungen, aber signifikante Änderungen der Intensität, Breite und Position des (001)-Röntgenreflexes von Smektit. Im Gegensatz zu den Experimenten mit verdünnter Gipshutlösung bzw. B36, zeigen die Experimente mit Opalinustonporenlösung bzw. SD80 minimale Änderungen der Peakform des Smektit. In Probe B36 werden eine Abnahme der Peakintensität und eine Zunahme der Halbwertsbreite (FWHM) bei Temperaturen über 60 °C in Gipshutlösung, insbesondere bei 90 °C, deutlich. Batch-Experimente mit Substrat zeigen ähnliche Effekte bereits ab 25 °C. Dies spricht für eine Abnahme der Quellfähigkeit, die nach Sättigung mit SrCl<sub>2</sub> (Belegung aller Proben mit gleichem Zwischenschichtkation) jedoch als reversibel eingestuft wird. Ein naheliegender Grund für die niedrigeren Intensitäten des 001 Smektit-Peaks im Vergleich zum Ausgangsmaterial ist die Delaminierung der Smektit-Schichtpakete. Weiterhin unterscheiden sich die beiden Bentonite in ihrer Kationenaustauschkapazität, so variieren die KAK-Werte von SD80 zwischen 94-100 cmol/kg und die von Probe B36 zwischen 74-90 cmol/kg. Die Mikrobenkontrollbatches zeigen eine Abnahme der Kationenaustauschkapazität mit steigender Temperatur > 60 °C. In den mit Substrat versetzten Proben sind die KAK-Werte im Vergleich zum Ausgangsmaterial bei 25 °C am niedrigsten, dort wo die höchste mikrobielle Aktivität erwartet wird. Die Änderungen zeigen sich ebenfalls in einer Zunahme der Halbwertsbreite (FWHM) und einer Abnahme der Peakintensität. Ein mikrobieller Einfluss bei Temperaturen über 60 °C ist auszuschließen.

Des Weiteren dominieren in Probe SD80 (25 °C, OPA, mit Substrat) Sulfat-reduzierende Mikroben (HZDR, Teilprojekt B). Das Reaktionsprodukt zeigt zudem schwarze Ausfällungen, die auf die Bildung von Fe-Sulfide schließen. Neben den Sulfat-reduzierenden könnten so auch Fe(III)-reduzierende Mikroben auftreten. Eine Erhöhung der Schichtladung durch mögliche Reduktion des Fe<sup>3+</sup> in der Oktaederschicht kann eine Abnahme der Quellfähigkeit verursachen. Um dies zu überprüfen werden zeitnah Schichtladungsmessungen an dieser Probenreihe durchgeführt.

Die im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführten Alterationsexperimente an verschiedenen Korngrößenfraktionen von Saponit (IMVITE 1016) und Wyoming Bentonit (SWy-3) in alkaliner Lösung sind abgeschlossen. Die Ergebnisse zeigen eine höhere Stabilität von trioktaedrischem Saponit (IMVITE 1016) gegenüber dioktaedrischem Montmorillonit (SWy-3).

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

Abschließende tonmineralogische Analyse (XRD, XRF, CEC) sowie Nasszelleexperimente mit Gipshut- und Opalinustonporenlösung an ausgewählten Proben der 2-Jahresreihe laufen. Zudem erfolgt die Bestimmung der austauschbaren Kationen mittels AAS als auch die der Schichtladung mittels O-D Methode an ausgewählten Bentoniten. Bisherige Ergebnisse werden zudem auf der 9ten MECC und auf der GeoBonn 2018 präsentiert.

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

Podlech, C.; Matschiavelli, N.; Grathoff, G.H. & Warr, L.N. (2018): Bentonite alteration in aqueous solutions relevant to the underground disposal of radioactive waste including the effects of microbial activity. Talk held at the 55th annual meeting of the Clay Minerals Society in Champaign, Illinois

Grathoff, G.H., Podlech, C., Warr, L.N. & Meleshyn, A. (2018): The stability of bentonites in aqueous solutions (25 to 120 °C) relevant to the underground sealing of radioactive waste deposits. Research Poster for the 9th Mid-European Clay Conference in Zagreb, Croatia

Warr, L.N., Podlech, C., Grathoff, G.H. & Kaufhold, S. (2018): The role of accessory minerals on the stability of the bentonite backfill. Talk will be given at GeoBonn 2018

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11344D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt D	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2015 bis 31.12.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 229.490,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Krüger

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Vorhabensziele:

Quantenmechanische Modellierung von Eisensubstitutionen im Kristallgitter und an den Oberflächen von Smektiten und Untersuchung des Einflusses auf die Mineraleigenschaften.

Bezug zu anderen Vorhaben:

Teilprojekt im Verbund „Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren“.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm umfasst folgende Arbeitspakete:

- Charakterisierung von Referenzmineralen
- Eisensubstitutionen in Smektiten
- Eisensubstitutionen an Smektitoberflächen
- Eisenadsorption an Smektitoberflächen erweitern!?

Ziel der Arbeiten ist ein Beitrag zur Charakterisierung von Eisenionen in Montmorillonit und Beidellit sowie die Untersuchung der Verteilung dieser Ionen im Festkörper und an seinen Oberflächen als Beitrag zur Untersuchung der Mineraleigenschaften in Abhängigkeit vom Eisengehalt.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Fe(III) in Ca-Smektiten

AP2: Fe(II)-Substitutionen in Smektiten

AP4: Eisenadsorption an Smektitoberflächen

Als Grundlage für die Modellierung von Fe(III)-Substitutionen in Ca-Smektiten (AP V1) wurde die Gitterstruktur von Ca-Smektiten untersucht. Verglichen wurden Modellsmektite der Schichtladung  $-0.5 e$  mit oktaedrischen, tetraedrischen sowie gemischten Substitutionen. Wie für Na-Smektite wird häufiger ein Gitter mit einer Verschiebung von  $-a/3$  zwischen Oktaeder- und Tetraederschicht bevorzugt. Bisher unverstandene Ausnahmen treten im Gegensatz zu Na-Smektiten jedoch auf. Ein ähnliches Ergebnis wurde für Mg als Zwischen-

schichtung erhalten, wobei das seltener bevorzugte Gitter mit  $+a/3$  Schichtverschiebung nur für transvakante Strukturen gefunden wurde.

Für eine oktaedrische Fe(III)-Substitution in Ca-Montmorillonit- und Ca-Beidellitmodellen (AP V1) mit einer Schichtladung von  $-0.5 e$  wurden ähnliche Eigenschaften erhalten wie für entsprechende Na-Smektitmodelle. Bevorzugte als auch ungünstigste Gitterplätze entsprechen denen von Na-Smektit, wobei geringfügige Unterschiede relativer Energien für Beidellit etwas größer ausfallen als für Montmorillonit. Die für Na-Smektite gefundene Korrelation relativer Energien verschiedener Gitterplätze von Fe(III) mit dem verfügbaren Volumen der Plätze gilt auch für Ca-Smektite, wobei auch hier für transvakante Montmorillonite keine Korrelation gefunden wurde, was noch einer Erklärung bedarf.

Untersuchungen zu oktaedrischen Fe(II)-Substitutionen in exemplarischen Smektitmodellen (AP2) wurden am Beispiel eisensubstituierter Pyrophyllits mit 1 oder 2 Fe(II)-Ionen pro  $2 \times 1 \times 1$  Einheitszelle begonnen. Dieses System kann als Modell eines substitutionsfreien Bereichs eines Smektit niedriger Schichtladung betrachtet werden. Mittlere Fe-O-Bindungslängen betragen etwa 202 pm für Fe(III) und 213 pm für Fe(II). Letzterer Wert übertrifft die analoge mittlere Mg-O-Bindungslänge (206 pm) da Fe(II) hier das größte Ion ist. Diesen Bindungsverhältnissen entsprechen relativ geringe Ausdehnungen der Gitterkonstanten von bis zu 4 pm für die Vektoren **a** und **b** im Vergleich mit analogen Mg-Substitutionen, während für **c** sogar eine geringfügige Kontraktion im Vergleich zur Mg-Substitution berechnet wird. Eine Abschätzung des Redoxpotentials liefert die vorläufigen Werte von 1.8 eV für eine Fe-Substitution und von etwa 1.4 eV für zwei Fe-Substitutionen pro Einheitszelle.

Die Modellierung der Adsorption von Fe(III) an Smektitkantenflächen (AP 4) wurde anhand eines Modells der Montmorillonitoberfläche (010) fortgesetzt. Untersucht wurden bidentate Aluminol-, gemischte Aluminol-Silanol- sowie Sorptionsplätze an trioktaedrischen Leerstellen der zentralen Oktaederschicht sowie einiger ihrer oktaedrisch substituierten Varianten. Für die Adsorption von  $\text{FeOH}^{2+}$  im Austausch gegen zwei Protonen der Oberfläche werden leicht endotherme Adsorptionsenergien von bis zu 100 kJ/mol berechnet. Bevorzugt sind dabei vor allem Plätze an oktaedrischen Mg-Substitutionen. Neben  $\text{FeOH}^{2+}$  wurden bisher auch  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  und  $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$  an Silanol-Aluminol-Plätzen als Adsorbate erhalten. Fe-M-Abstände zu oktaedrischen Kationen sowie Fe-Si-Abstände variieren mit den Sorptionsplätzen und sind eventuell geeignet, diese in Experimenten zu unterscheiden.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Fe(III) in Ca-Smektiten

AP2: Fe(II)-Substitutionen in Smektiten

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag A. Kremleva, S. Krüger, N. Rösch: Quantum chemical modeling of Fe(III) in 2:1 dioctahedral smectites, 55. Annual Meeting of the Clay Mineral Society, 11.-14.6.2018, Urbana-Champaign, IL, USA

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11355</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander)		
<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> 01.03.2015 bis 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 307.607,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schultmann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Herausforderungen der Allokation beständiger Gefahrgüter am Beispiel der Endlagerung radioaktiven Abfalls über wirtschaftswissenschaftliche Laborexperimente besser zu verstehen, Ansätze für eine Lösung dieses gesellschaftlichen Dilemmas zu identifizieren und (wirtschafts-)politische bzw. strategische Empfehlungen abzuleiten. Das Problem wird gezielt in einer Serie von Laborstudien untersucht und um ausführliche Stakeholder-Interviews ergänzt, um sowohl theoretisch als auch empirisch fundierte Lösungsansätze zur Bewältigung der Herausforderungen im Prozess der Endlagersuche zu erarbeiten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das vorliegende Forschungsvorhaben lässt sich als iterativer Prozess verstehen. Ausgehend von einem intensiven Studium der Literatur bezüglich vorheriger Laborexperimente und der Evaluation möglicher Experimentdesigns in Expertengesprächen wird ein grundlegendes Basisdesign entworfen, das im Laufe des Projekts unterschiedlich variiert wird.

Jeder Schritt der erneuten Variation der zu beobachtenden Variablen geht somit auf eine begleitende Diskussion mit Experten und eine Literaturrecherche zurück. Damit soll für jede Untersuchungseinheit bzw. für jeden Analyseschritt ein gewisses Maß externer Validität gewährleistet werden. Zudem geben die Interviews wesentliche Impulse zur Hypothesenbildung.

Das Projekt gliedert sich damit in zwei Phasen. Zum einen wird die Entwicklung eines Designs fokussiert, zum anderen wird dieses Design im weiteren Verlauf gezielt angewandt und variiert.



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

Im ersten Halbjahr 2018 wurden vor allem weitere Experimente durchgeführt. Die daraus entstandenen Daten werden aktuell ausgewertet. Darüber hinaus wurden fünf Experteninterviews durchgeführt, in denen das Modell und die Ergebnisse validiert wurden. Zudem wurde mit der Verschriftlichung der Ergebnisse begonnen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Daten aus allen Arbeitspaketen werden weiter ausgewertet und die Ergebnisse zu Papier gebracht.

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

Publikationen aktuell in Arbeit.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11365</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2015 bis 31.05.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 827.281,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hagemann	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

- Ermittlung der Löslichkeitsgrenzen für Spalt- und Aktivierungsprodukte in salzhaltigen Wässern von norddeutschen Unterkreideton- und Steinsalzformationen
- Entwicklung von theoretischen Methoden zur Ableitung thermodynamischer Größen für Spalt- und Aktivierungsprodukte
- Abbau der Ungewissheiten in Bezug auf die geochemischen Eigenschaften dieser chemischen Elemente und Verbesserung der Belastbarkeit von Ergebnissen von geochemischen Modellrechnungen

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Auswertung von Korrosionsexperimenten an radioaktiven Abfällen
- Ermittlung von Bandbreiten für die Zusammensetzungen salzhaltiger Lösungen im Endlager
- Experimentelle Ermittlung maximaler Lösungskonzentrationen
- Ermittlung thermodynamischer Größen durch Schätzverfahren
- Geochemische Modellierung der Radionuklidlösungskonzentration im Nahfeld
- Ableitung von Löslichkeitsgrenzen
- Überprüfung der Auswirkung neuer oder aktualisierter Löslichkeitsgrenzen auf die Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Versuche zur Bestimmung der Löslichkeit von Radionukliden in Salzlösungen bei verschiedenen pH-Werten wurden fortgesetzt. Die Versuchsreihen in mit Halit und Anhydrit gesättigten Lösungen wurden weitgehend abgeschlossen. Bei einigen Elementen (u. a. Selenit, Nickel, Blei) traten sehr langsame Umwandlungsprozesse auf, die zu einer Senkung der zunächst eingestellten pH-Werte führten. Die Ursache dürfte in der Umwandlung der primär vorhandenen Bodenkörper in offenbar hydroxidreichere Phasen und Bodenkörper zu suchen sein.

Im Berichtszeitraum wurden zudem Löslichkeitsversuche in IP9-Lösung begonnen, einer Lösung, die beim Kontakt Halit-gesättigter Lösungen mit polyhaltischen Steinsalz entsteht. Wegen ihres Magnesiumgehaltes puffert die IP-Lösung den pH-Wert. Versuche bei pH-Werten über 9 werden mit einer berechneten Reaktionslösung durchgeführt, die sich nach einer vollständigen Ausfällung des Magnesiums als Brucit ergäbe. Weiterhin wurden Versuche mit einem Unterkreidetonwasser angesetzt. In Ermangelung von Felddaten wurde die Zusammensetzung dieses Wassers aus vorhandenen Salinitätsgradienten und Informationen zur Mineralogie norddeutscher Unterkreide-Tonformationen berechnet.

Im Rahmen der Arbeiten zu Schätzverfahren wurden eine rechnerische Methode entwickelt und in einem Programm implementiert, um binäre und ternäre Pitzer-Ionenwechselwirkungskoeffizienten zeitgleich aber unkorreliert aus Löslichkeitsversuchen in ternären Systemen abzuleiten. Das Verfahren wurde an neuen Messdaten für das System  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-SrSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  und  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-BaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  erfolgreich erprobt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Fortsetzung der Versuche zur Bestimmung der Löslichkeit von Spaltelementen in ausgewählten salinaren Lösungen.

Untersuchung von Analogien und Korrelationen für ausgewählte Wechselwirkungen zwischen Spaltelement-Spezies und Hintergrundsalkationen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11385</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.4		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2015 bis 30.06.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 549.185,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Jobmann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Zuge des Vorhabens soll zunächst die Entwicklung von Monitoring-Konzepten für Endlager in einer Tonformation in Deutschland verfolgt werden. Diese Monitoring-Konzepte soll entwickelt werden auf der Basis des Monitoring Workflows, der im Rahmen des internationalen MoDeRn-Projektes erarbeitet wurde. Ein Monitoring-Konzept soll so ausgerichtet sein, dass es möglich ist, im Zusammenspiel mit dem Einlagerungskonzept bzw. der zeitlichen Abfolge der Einlagerung, die Möglichkeiten und Grenzen einer Überwachung nach Verschluss des Endlagers noch während der Betriebsphase zu bewerten. In Ergänzung dazu werden in analogerer Weise auch die konzeptionellen Überlegungen zum Monitoring eines Endlagers in einer Steinsalzformation aus dem MoDeRn Projekt weiterentwickelt.

Ein weiteres Teilziel ist die Entwicklung von sogenannten „Trigger Values“. Das sind Werte von Messgrößen oder zeitliche Entwicklung von Messgrößen, die, wenn sie erreicht werden, darauf hindeuten, dass das Endlagersystem möglicherweise nicht mehr der erwarteten Entwicklung also dem „Referenzszenario“ entspricht. Abschließend sollen mögliche Handlungsoptionen bei Erreichen von „Trigger Values“ erarbeitet werden sowie eine Einschätzung bzgl. der Effektivität eines Monitorings nach Verschluss des Endlagers. Aktuelle Arbeiten und Ergebnisse des Vorhabens sollen auf entsprechenden internationalen Workshops präsentiert und diskutiert werden, um eine möglichst breite internationale Akzeptanz der Konzeptionen zu erzielen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Weiterentwicklung Monitoring-Konzept für Endlager im Steinsalz
- AP2: Neuentwicklung Monitoring-Konzepte für Endlager im Tonstein
- AP3: Erzeugung synthetischer Monitoring-Ergebnisse und Ableitung von „Trigger Values“ für einzelne Endlagerkomponenten
- AP4: Handlungsoptionen bei Erreichen von „Trigger Values“ und offene Fragen
- AP5: Dokumentation der Ergebnisse

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

Als eine Randbedingung für die Entwicklung von Monitoring-Konzepten wurde vorgesehen, die Endlagerkonzepte aus dem Forschungsvorhaben ANSICHT zu verwenden, im Rahmen dessen ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in einer Tonformation in Deutschland entwickelt wurde. Aus den dortigen Endlagerkonzepten wird zunächst die Option vertikale Bohrlochlagerung verwendet. Zur Ausarbeitung eines Monitoring-Programms wird der „Parameter-Screening“ Prozess genutzt, der im Rahmen des MODERN2020 Projektes entwickelt wird. Dieser Screening Prozess hat zum Ziel, diejenigen Parameter zu identifizieren, die geeignet sind, Informationen über die Entwicklung des Endlagers im Bereich einzelner geotechnischer Barrieren zu liefern.

Im Berichtszeitraum wurde der im Projekt mehrfach getestete Parameter-Screening-Prozess und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen in das europäische Monitoring-Projekt MODERN2020 eingespielt. Auf einem Fachworkshop in Uppsala, Schweden, wurden die Testergebnisse zusammen mit den Ergebnissen anderer Projektpartner vorgestellt und intensiv diskutiert. Schlussendlich wurde vereinbart, den bisherigen Parameter-Screening Prozess anhand der Diskussionsergebnisse zu überarbeiten. Im Berichtszeitraum erfolgte eine entsprechende Zuarbeit seitens der Projektpartner. Eine überarbeitete Version des Screening-Prozesses wurde auf einem Treffen der Projektpartner in Sargans in der Schweiz vorgestellt. Parallel dazu wurde ein Berichtsentwurf vorgestellt, der die überarbeitete Version beschreibt. Dieser Berichtsentwurf wurde an die Projektpartner mit der Bitte um Durchsicht verteilt.

Es wurde damit begonnen, zu erarbeiten, in welcher Form Entscheidungsprozesse im Zuge der Endlagerentwicklung während der Betriebsphase mit Ergebnissen eines Endlager-Monitorings verknüpft sein können. Es wurden erste Entwürfe von Ablaufdiagrammen erstellt, die diese Verknüpfungen anschaulich aufzeigen. Parallel dazu wurden Überlegungen angestellt, welche Reaktionsoptionen bestehen, wenn Monitoring-Ergebnisse Abweichungen von der erwarteten Entwicklung der beobachteten Endlagerkomponente anzeigen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Fortführung der Arbeiten zur Entwicklung eines Monitoring-Konzeptes für das Endlagerkonzept der vertikalen Bohrlochlagerung, speziell des Verschlusskonzeptes, aus dem ANSICHT Projekt. Hierbei soll insbesondere Bezug genommen werden auf die Aussagen des Berichtes der Endlagerkommission, der Ende 2016 vorgelegt wurde und auf die Sicherheitsanforderungen, die seitens des BMUB im Jahr 2010 vorgelegt wurden.

Weiterentwicklung der Ablaufdiagramme, die die Verknüpfungen zwischen Monitoring-Ergebnissen und Entscheidungsprozessen aufzeigen.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11395</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieften in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2015 bis 30.04.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.04.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 283.017,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Thiemeyer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben hat zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Dies schließt auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein solches Endlager ein. Das erste Teilziel ist die Herleitung von generischen geologischen Modellen inklusive Modellparametern als Grundlage für die Gruben- gebäudekonzeption und Auslegungsberechnungen. Das zweite und dritte Teilziel sind die Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes sowie die Entwicklung von technischen Konzepten für Endlagerbergwerke für vier verschiedene Einlagerungsvarianten. Das vierte Teilziel ist die Überprüfung der Ausweisbarkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Integritäts- und Konsequenzenanalyse für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in der flachen Lagerung). Insgesamt werden mit dem Vorhaben technisch-wissenschaftliche Grundlagen für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern in unterschiedlichen geologischen Formationen geschaffen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Grundlagenermittlung (BGE TEC)
- AP2: Erstellung von generischen geologischen Modellen, Ableitung von Modellparametern (BGR und IfG)
- AP3: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (GRS)
- AP4: Analyse der geomechanischen Integrität (BGR und IfG)
- AP5: Entwicklung von Endlagerkonzepten (BGE TEC)
- AP6: Analyse der radiologischen Konsequenzen (GRS)
- AP7: Bewertung der Betriebssicherheit (BGE TEC)
- AP8: Synthesebericht (BGE TEC)

Die BGR ist gemeinsam mit IfG federführend für die AP2 und AP4 zuständig und weiterhin am AP6 beteiligt.

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

Die Arbeiten im AP2 sind abgeschlossen. Der im Rahmen des AP2 erstellte Zwischenbericht „Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen (KOSINA)“ liegt vor.

Die Arbeiten im AP4 konzentrierten sich auf die Berechnungen zur Überprüfung der Integrität der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen.

Bei der BGR wurden die bergschadenkundlichen Berechnungsgrößen für die Varianten Streckenlagerung und vertikale Bohrlochlagerung abgeschätzt. Ein Vergleich mit Bewegungsgrenzwerten für die zulässige Objektbeanspruchung aus dem konventionellen Ingenieurbereich zeigt, dass die Werte für die beiden Einlagerungsvarianten sehr klein sind. Vor allem, da die Grenzwerte üblicherweise für ein Zeitfenster von ca. 100 - 200 Jahren gelten und bei den Berechnungen die Maxima für das Endlager nach mehreren hundert bis 1000 Jahren auftreten. Die Ergebnisse dieser Abschätzungen wurden im AP4-Bericht in tabellarischer Form erfasst.

Der im Rahmen des AP4 erstellte Zwischenbericht „TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA“) befindet sich im internen QS-Verfahren. Den Projektpartnern liegt der Bericht im Entwurf vor.

Der Parameterbericht „Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen (Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA)“ wurde fertiggestellt und befindet sich im Druck. Den Projektpartnern liegt der Bericht im Entwurf vor.

Die Ergebnisse des Projektes von allen Projektpartnern werden in einem abschließenden Synthesebericht zusammengefasst. Die finalen Abstimmungen zum Synthesebericht sind abgeschlossen. Der Bericht wird durch BGE TEC formatiert, abschließend bearbeitet, gedruckt und an alle beteiligten Organisationen verteilt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Das Projekt ist abgeschlossen.

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

Liu, W., Völkner, E., Minkley, W., Popp, T. (2018): Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen (Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA). Zwischenbericht.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11405A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2015 bis 30.04.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.04.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 650.107,83 EUR	<b>Projektleiter:</b> Bollingerfehr	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben hat zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Dies soll auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein solches Endlager einschließen. Das erste Teilziel ist die Herleitung von generischen geologischen Modellen inklusive Modellparametern als Grundlage für die Grubengebäudekonzeption und Auslegungsberechnungen. Das zweite und dritte Teilziel sind die Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes sowie die Entwicklung von technischen Konzepten für Endlagerbergwerke für vier verschiedenen Einlagerungsvarianten. Das vierte Teilziel ist die Überprüfung der Ausweisbarkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Integritäts- und Konsequenzenanalyse für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in der flachen Lagerung). Insgesamt werden mit dem Vorhaben technisch-wissenschaftliche Grundlagen geschaffen für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Grundlagen ermitteln und zusammenstellen
- AP2: Erstellung von generischen geologischen Modellen, Ableitung von Modellparametern
- AP3: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes
- AP4: Analyse der geomechanischen Integrität
- AP5: Entwicklung von Endlagerkonzepten
- AP6: Analyse der radiologischen Konsequenzen
- AP7: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP8: Synthesebericht

BGE TECHNOLOGY GmbH ist federführend zuständig für AP1, AP5, AP7 und AP8



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

Der Schwerpunkt der Arbeiten konzentrierte sich im Berichtszeitraum auf den Abschluss der Arbeiten zu den Arbeitspaketen 5 und 7 sowie auf die Fertigstellung der entsprechenden AP-Berichte und den gemeinsamen Synthesebericht.

Die Berichte zum AP5 "Technische Konzepte für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen" und zum AP7 "Analyse der Betriebssicherheit von Endlagern in flachlagernden Salzformationen" wurden fertiggestellt und intern in die Freigabe gegeben.

Mit den Projektpartnern wurde der gemeinsame Synthesebericht (in English) erarbeitet, im Detail abgestimmt und zur Freigabe vorbereitet.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Abschluss und Versand des Syntheseberichts sowie der Berichte zum AP5 "Technische Konzepte für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen" und AP7 "Analyse der Betriebssicherheit von Endlagern in flachlagernden Salzformationen".

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

Bollingerfehr, W. et al: Generic HLW Repository in Bedded Salt in Germany: Emplacement Technologies and Repository Designs, WM2018 Conference, March 18 - 22, 2018, Phoenix, Arizona, USA

Kuate Simo, E. (BGE TECHNOLOGY GmbH) und Mattheo, E. (SANDIA): Studies on Qualification of Numerical and Semi-Analytical Modeling Codes for the Thermal Design of Disposal Layout for HLW Repository, WM2018 Conference, March 18-22, 2018, Phoenix, Arizona, USA

Kuate Simo, E. (BGE TECHNOLOGY GmbH) und Knauth, M. (IfG): Auslegung und Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager in flach lagernden Salzformationen – das Projekt KOSINA, 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, Karlsruhe, 21. Juni 2018

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11405B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.2		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2015 bis 30.04.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.04.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 525.090,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Kindlein	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben hat zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Dies soll auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein solches Endlager einschließen. Das erste Teilziel ist die Herleitung von generischen geologischen Modellen inklusive Modellparametern als Grundlage für die Grubenbaukonzeption und Auslegungsberechnungen. Das zweite und dritte Teilziel sind die Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes sowie die Entwicklung von technischen Konzepten für Endlagerbergwerke für vier verschiedenen Einlagerungsvarianten. Das vierte Teilziel ist die Überprüfung der Ausweisbarkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Integritäts- und Konsequenzenanalyse für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in der flachen Lagerung). Insgesamt werden mit dem Vorhaben technisch-wissenschaftliche Grundlagen geschaffen für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Grundlagen ermitteln und zusammenstellen
- AP2: Erstellung von generischen, geologischen Modellen, Ableitung von Modellparametern
- AP3: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes
- AP4: Analyse der geomechanischen Integrität
- AP5: Entwicklung von Endlagerkonzepten
- AP6: Analyse der radiologischen Konsequenzen
- AP7: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP8: Synthesebericht

GRS ist federführend für die Arbeitspakete 3 und 6.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Es wurden im Berichtszeitraum insgesamt 4 Arbeitsgespräche mit den vier am Projekt beteiligten Organisationen (GRS, BGR, BGE TECHNOLOGY und IfG) durchgeführt. Die diskutierten Inhalte betrafen die Ergebnisse der geologischen, geomechanischen und radiologischen Modellrechnungen sowie die Entwürfe der Abschlussberichte. Die Arbeiten in den Arbeitspaketen waren:

AP2: Prüfung und Kommentierung des Abschlussberichts.

AP3: Fertigstellung des Abschlussberichts für Sicherheits- und Nachweiskonzepte für ein Endlager in flach lagernden Salzstrukturen sowie des Konzepts für den Umgang mit Ungewissheiten.

Der Abschlussbericht wurde fertiggestellt, Änderungswünsche und Kommentare der Projektpartner wurden berücksichtigt. Der Bericht wurde redaktionell überarbeitet und gedruckt.

AP4: Diskussion und Kommentierung von Entwürfen des Abschlussberichtes zu den geomechanischen Modellrechnungen und zur Integritätsanalyse. Diskussion von Ergebnissen zu bergschadenkundlichen Bewegungsgrößen.

AP5: Diskussion von Ergebnissen zur Qualifizierungsstudie der semi-analytischen Codes MathCAD und LinSOUR mit SANDIA. Untersuchungen zur Konvergenz- und Porositätsentwicklung bei einem Temperaturkriterium von 100 °C anstatt 200 °C.

AP6: Durchführung von radiologischen Modellrechnungen, Diskussion der Ergebnisse, Berichterstellung.

Die Arbeiten zur radiologischen Konsequenzenanalyse wurden im Berichtszeitraum abgeschlossen. Deterministische Modellrechnungen für die Modellvariante „kleiner ewG“ wurden durchgeführt und ausgewertet. Probabilistische Rechnungen für die Endlagervariante Streckenlagerung wurden durchgeführt, die Ergebnisse statistisch ausgewertet und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Methodik und Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse wurden im März 2018 auf der WM2018 Conference, in Phoenix, Arizona, USA vorgestellt. Der Abschlussbericht wurde entworfen, mit den Projektpartnern diskutiert und abschließend fertiggestellt.

AP7: Diskussion von Ergebnissen der Betriebsstörungsanalysen. Diskussion und Kommentierung von Entwürfen des Abschlussberichtes zur Bewertung der Betriebssicherheit.

AP8: Erstellung des gemeinsamen Abschlussberichts. Der Synthesebericht wurde diskutiert, Textbausteine erstellt und Entwürfe überarbeitet und iteriert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Vorhaben ist abgeschlossen.

Abschlussberichte werden gedruckt und versandt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

2 Konferenzbeiträge (WM2018), 3 Abschlussberichte (AP3, AP6, AP8).

<b>Zuwendungsempfänger:</b> IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstr. 60, 04279 Leipzig		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11405C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2015 bis 30.04.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.04.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 599.728,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Minkley	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben hat zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Dies soll auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein solches Endlager einschließen. Das erste Teilziel ist die Herleitung von generischen geologischen Modellen inklusive Modellparametern als Grundlage für die Grubengebäudekonzeption und Auslegungsberechnungen. Das zweite und dritte Teilziel sind die Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes sowie die Entwicklung von technischen Konzepten für Endlagerbergwerke für vier verschiedenen Einlagerungsvarianten. Das vierte Teilziel ist die Überprüfung der Ausweisbarkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Integritäts- und Konsequenzenanalyse für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in der flachen Lagerung). Insgesamt werden mit dem Vorhaben technisch-wissenschaftliche Grundlagen geschaffen für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Grundlagen ermitteln und zusammenstellen
- AP2: Erstellung von generischen geologischen Modellen, Ableitung von Modellparametern
- AP3: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes
- AP4: Analyse der geomechanischen Integrität
- AP5: Entwicklung von Endlagerkonzepten
- AP6: Analyse der radiologischen Konsequenzen
- AP7: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP8: Synthesebericht

Das IfG ist gemeinsam mit BGR federführend für die AP2 und AP4 zuständig und führt ergänzende Untersuchungen zur Dichtheit von Salzgesteinen und zur Fluidperkolation durch.

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

Die Abschlussfassungen des AP4 und des Syntheseberichtes zum Gesamtprojekt wurden erarbeitet und im Rahmen von mehreren Projektgesprächen zur Berichtserstellung mit den Partnern abgestimmt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine (Projektende).

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

Zur Waste Management Conference im März 2018 in Phoenix wurden vom IfG zwei Vorträge zur Dichtheit von Salzgesteinen und Fluidperkolation sowie zu THM-gekoppelten Berechnungen zur Barriereintegrität für ein HLW-Endlager in flach lagernde Steinsalzformationen gehalten. Der Beitrag zur WM2018 Conference, Paper # 18289 “THM-Coupled Modeling of Barrier Integrity for HLW-Disposal in Bedded Salt” wurde von den Veranstaltern mit “Superior” bewertet, bezüglich aktueller Fragen und Entwicklungen geologischer Endlager im Salzgestein.

Zielstellung, Struktur und Ergebnisse des KOSINA-Projektes wurden in einem Vortrag auf dem 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle am 21.06.2018 am KIT in Karlsruhe präsentiert.

Weiterhin wird das Projekt im Rahmen des US-German-Workshops am 10. und 11. September 2018 in Hannover vorgestellt. Ergebnisse aus Nachrechnungen zu früheren Versagensfällen im Salzbergbau, die zur Validierung der Berechnungscode dienen, werden bei der Salt-Mech 8 in Hannover vom 12.-14. September 2018 präsentiert und im Tagungsband veröffentlicht.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstr. 21, 55122 Mainz		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11415A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 431.000,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Reich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die geochemische Wechselwirkung der Actiniden Np, Pu und des Spaltproduktes Tc mit Zementkorrosionsphasen sowie die Vorgänge an der Grenzfläche zwischen Beton und natürlichem Tongestein bzw. Bentonit werden bei mittleren und hohen Ionenstärken untersucht. Bei den Studien mit Pu wird auch der Einfluss organischer Zusätze auf dessen Sorption an Zementphasen betrachtet. Der Schwerpunkt der Studien soll bei den drei- und vierwertigen Actiniden und beim vierwertigen Technetium liegen. Teilweise sollen aber auch Np(V) und Tc(VII) zum Vergleich mit in die Untersuchungen einbezogen werden. Zur Identifizierung der wichtigsten Prozesse bei der Radionuklidrückhaltung sollen die Sorptions- und Diffusionsexperimente mit Speziationsmethoden (XAFS, XRD, XPS, CE-ICP-MS) gekoppelt werden. Diese Daten sollen es ermöglichen, die wichtigsten Prozesse wie Sorption und Diffusion zu modellieren und auf molekularer Ebene zu verstehen, so dass Vorhersagen im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse gemacht werden können. Im Rahmen des Verbundprojekts wird schwerpunktmäßig mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, dem Karlsruher Institut für Technologie, der Universität des Saarlandes und der TU München zusammengearbeitet.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Untersuchung des Einflusses von Zementalterationsphasen auf die Migration von Np, Pu und Tc in Portlandzement
- Einfluss von organischen Zementadditiven auf die Sorption von Plutonium an Zementphasen
- Untersuchung der Diffusion von Np, Pu und Tc in Tongestein unter hyperalkalinen Bedingungen
- Untersuchung der Sorption von Pu und Tc an Ca-Bentonit und ihrer Diffusion in kompaktiertem Ca-Bentonit unter hyperalkalinen Bedingungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In Batch-Experimenten wurde die Sorption von U(VI) an Zementsteinpulver (HCP; w/z = 0,5) in Gegenwart von Zementporenwasser (VGL-ACW) bei pH 12,2 unter Argon-Atmosphäre studiert. Dabei wurde zum einen bei einem konstanten Fest-flüssig-Verhältnis (S/L) von 5 g/L die Urankonzentration von  $10^{-7}$  bis  $10^{-5}$  M variiert, und zum anderen wurden bei  $10^{-6}$  M U(VI) unterschiedliche S/L-Verhältnisse zwischen 0,5 bis 20 g/L verwendet. In den meisten Experimenten lag die Uransorption dabei bei 99 % mit einem  $\log K_d(\text{L/kg}) \geq 4$ .

Die bereits zuvor röntgenspektroskopisch beobachtete Oxidation von Pu(III) zu Pu(IV) beim Kontakt mit HCP konnte durch Pu  $L_3$ -Kante XANES-Messungen an der Rossendorf Beamline (ESRF) bestätigt werden. Außerdem wurden in dieser Strahlzeit neben HCP-Proben, die in verschiedenen Elektrolytlösungen (verdünnte Gipschlösung (VGL), ACW, VGL-ACW) mit  $5 \mu\text{M}$  Pu(III) kontaktiert worden waren, auch die Wechselwirkung von Pu(III) mit CSH-Phasen (C:S 0,75 und 1,65) studiert. Bei allen HCP- und CSH-Proben konnten mehrere Koordinationsschalen in den EXAFS-Spektren modelliert werden, die auf einen Einbau des Pu in die Zwischenschichten der CSH-Phasen hinweisen: Pu-O bei 2,8 Å, Pu-Si<sub>1</sub> bei 3,2 Å, Pu-Si<sub>2</sub> bei 3,5 Å und Pu-Ca bei 4,1 Å.

Der Prototyp einer neuen Diffusionszelle wurde erstmals mittels der Diffusion von tritiiertem Wasser (HTO) in Zementstein (w/z = 0,5;  $\varnothing = 25$  mm; h = 5 mm) erprobt, ohne dass der Zementzylinder zwischen Filter eingespannt werden musste. Das Experiment dauerte 94 Tage und ergab für HTO einen effektiven Diffusionskoeffizienten  $D_e = 1,6 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  und einen Kapazitätsfaktor  $\alpha = 1,81$ .

Ein zweiter experimenteller Aufbau für Diffusionsexperimente mit stark sorbierenden Radioelementen wurde zunächst mittels der Eindiffusion von Cs<sup>+</sup> in Opalinuston ( $\varnothing \approx 6$  mm; h  $\approx 10$  mm) über einen Zeitraum von 12, 26 bzw. 40 Tagen getestet. Die dabei bestimmten Diffusionsparameter stimmen gut mit den Ergebnissen von Van Loon und Müller (2014) überein.

Die beiden Experimente zur Diffusion von <sup>99</sup>Tc(VII) in Bentonit mit VGL als mobile Phase bei 60 °C an Luft wurden abgeschlossen. Die zuvor mittels HTO-Diffusion bestimmten Porositäten des Bentonits betragen 0,36 bzw. 0,40. Die Diffusionsparameter für Tc(VII) sind  $D_e = (2,5 \pm 0,1) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  und  $\alpha = 0,21 \pm 0,01$ .

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Abschluss der Batch-Versuche zur Sorption von Actiniden an CSH-Phasen in VGL-CW
- Abschluss der Untersuchung des Einflusses von Gluconat auf die Sorption von Pu(III) an Zementstein
- Abschluss der Experimente zur Diffusion von Tc(VII) in kompaktiertem Ca-Bentonit bei Raumtemperatur
- Im Falle einer Aufstockung und Verlängerung des Vorhabens: Beginn von Experimenten zur Diffusion von Np, Pu und Tc in Zementstein und Tongestein unter Verwendung der modifizierten, filterfreien Diffusionszellen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

M. A. Veicht: Influence of cement pore water on the sorption of actinides on natural argillaceous rocks, 2018, Masterarbeit

D. P. Dahler: Diffusionsexperimente mit stark sorbierenden Radionukliden in Tongestein, 2018, Diplomarbeit

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11415B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 638.860,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Schmeide	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens sind Beiträge zur Verbesserung des Verständnisses dominierender Prozesse für die Mobilisierung bzw. Immobilisierung von Radionukliden auf molekularer Ebene sowie die Bestimmung quantitativer Parameter zur geochemischen Radionuklidrückhaltung an endlagerrelevanten Festphasen. Im Detail wird das Rückhaltevermögen von Zementphasen und Tonmaterialien gegenüber Radionukliden (Cm, Eu, U, Tc) unter hyperalkalinen Bedingungen bei mittleren bis hohen Ionenstärken mittels Batch- und Diffusionsexperimenten untersucht. Durch Einsatz spektroskopischer Methoden sollen gebildete Oberflächenkomplexe bzw. der strukturelle Einbau der Radionuklide in die Mineralphasen auf molekularer Ebene spezifiziert und über längere Zeiträume verfolgt werden, um eine mögliche Freisetzung von Radionukliden infolge von veränderten Umgebungsparametern aufzuzeigen. Ein weiteres Ziel besteht in der Bereitstellung verbesserter Bewertungsgrundlagen zum Einfluss polymerer Zementfließmittel (Superplasticizer) auf das Adsorptionsverhalten von Radionukliden im Freisetzungsfall. Am Beispiel von Polycarboxylatethern (PCE) als aktuelle Generation von Superplasticizern sollen die Bedingungen für eine verringerte adsorptive Immobilisierung von Actiniden-Analoga an Zementphasen und Tonmaterialien festgestellt werden. 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

- AP1: Spektroskopische Untersuchung der Stabilität von Radionuklid-dotierten Zementphasen (Cm, U und Tc)
- AP2: Spektroskopische Untersuchung der Stabilität von Radionuklid-dotierten Tonmineralphasen (Cm, U und Tc)
- AP3: Untersuchung der Sorption und Diffusion von U an/in Tongestein und Ca-Bentonit unter hyperalkalinen Bedingungen
- AP4: Untersuchung der Komplexbildung von Eu mit polymeren Zementfließmitteln (Polycarboxylatether)
- AP5: Synthese und Charakterisierung <sup>14</sup>C-markierter Polycarboxylatether
- AP6: Untersuchung des Einflusses polymerer Zementfließmittel (Polycarboxylatether) auf die Adsorption von Eu an Zementphasen
- AP7: Untersuchung des Einflusses polymerer Zementfließmittel (Polycarboxylatether) auf die Adsorption von Eu an Tongestein und Ca-Bentonit
- AP8: Entwicklung geochemischer Modelle
- AP9: Methodenentwicklung

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Um bei der U(VI)-Sorption an Ca-Bentonit unter alkalischen Bedingungen zwischen Rückhaltung durch Oberflächenkomplexierung und -ausfällung unterscheiden zu können, wurden EXAFS-Messungen der U(VI)-Oberflächenkomplexe durchgeführt (ESRF, Grenoble). In Abhängigkeit vom pH-Wert konnten zwei Einzelkomponenten identifiziert werden, die sich bezüglich der Abstände zum äquatorialen Sauerstoff und Koordinati-



onzahl unterscheiden. Eine U(VI)-Ausfällung war nicht nachweisbar, folglich ist die U(VI)-Adsorption der vorherrschende Retentionsmechanismus.

Um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zur Stabilität von U(VI)-dotierten CSH-Phasen in Gegenwart endlagerrelevanter Salzlösungen und somit bei höheren Ionenstärken (*I*) auf realere aluminiumhaltige Zementssysteme zu prüfen, wurden U(VI)-dotierte CASH-Phasen mit einem Ca/Si-Verhältnis von 1,0, einem Al/(Al+Si)-Verhältnis von 0,05 und drei U(VI)-Beladungen (30-300 ppm) hergestellt. TRLFS-Untersuchungen zeigten, dass bei hohen U(VI)-Beladungen eine Uranophan-Phase ausfällt, während die Probe mit der geringen U(VI)-Beladung ein unbekanntes Spektrum zeigt.

Molekulare Strukturen der im pH-Bereich 2 bis 8 dominierenden U(VI)-Citrat Spezies wurden mittels Kombination spektroskopischer Methoden (<sup>1</sup>H-, <sup>13</sup>C-, und <sup>17</sup>O-NMR, EXAFS- und UV-Vis-Spektroskopie) untersucht. Als dominierende Spezies wurden mehrkernige U(VI)-Citrat 2:2-, 3:3- und 3:2-Komplexe identifiziert bzw. durch Anwendung komplementärer Methoden bestätigt. Die Erkenntnisse zur molekularen Geometrie, Konformation und Konfiguration der Komplexstrukturen sind essentiell für das Verständnis der Komplexbildungsreaktion und dienen als Grundlage für die Best. von Komplexstrukturen und -stabilitäten unter alkalischen Bedingungen auftretender Spezies.

Gegenstand weiterer Arbeiten war das Mobilisierungsvermögen polymerer Zementfließmittel gegenüber Actiniden im Freisetzungsfall. Mittels <sup>152</sup>Eu als Analogtracer wurde der Einfluss eines kommerziellen Superplastiziers (PCE-Basis, MasterGlenium®51) auf die Adsorption an Ca-Bentonit bei pH 9, 11 und 13 unter Ausschluss von CO<sub>2</sub> untersucht, wobei die Haupt-Elektrolytbestandteile NaCl und CaCl<sub>2</sub> in Konzentrationen bis 4 M zugegeben wurden. Ionenstärkeabhängige mobilisierende Effekte des Superplastiziers (so festgestellt in Wandsorptions-Kontrollexperimenten) konnten im ternären System aufgrund der hohen Sorptionskapazität des Tons nicht beobachtet werden.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im System U(VI)/Ca-Bentonit sollen pH-induzierte Veränderungen der Tonoberfläche (Mineraleauflösung, -umwandlung, -neubildung) mit Hilfe von AFM und CTR/RAXR betrachtet werden, um deren Einfluss auf das U(VI)-Retentionsverhalten abschätzen zu können. Weiterhin wird der Einfluss organischer Liganden (Isosaccharinsäure) auf die U(VI)-Sorption bei alkalischen Bedingungen untersucht. Die Komplexierung im System U/ISA wird mittels TRLFS untersucht.

Zur Charakterisierung U(VI)-dotierter CASH-Phasen werden PXRD, NMR, TGA und DSC eingesetzt und Leaching-Experimente zur Beurteilung ihrer Stabilität bei hohen *I* durchgeführt.

Untersuchung der [<sup>152</sup>Eu]Eu(III)-Adsorption an Ca-Bentonit in Abhängigkeit von der Eu-Konzentration in An- und Abwesenheit von PCE (pH 9-13; 0-4 M NaCl bzw. CaCl<sub>2</sub>) unter CO<sub>2</sub>-Ausschluss zur Erfassung von Ionenstärkeeffekten bei sehr geringen Actinid-Konzentrationen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Zedek, L., Lippold, H., Šembera, J.: Computer simulation of the ternary problem – technical aspects and possibilities. IFAC-PapersOnLine 51, 589-594 (2018)

Philipp, T., Schmeide, K., Rossberg, A., Stumpf, T.: Competition of U(VI) hydroxide and carbonate complexation in alkaline solutions – implications for U(VI) retention by Ca-bentonite. Poster: RadChem 2018 - 18th Radiochemical Conference, 13.05.-18.05.2018, Mariánské Lázně, Czech Republic

Wolter, J.-M., Schmeide, K., Huittinen, N., Stumpf, T.: Stability investigations of actinide doped calcium silicate hydrate phases in highly saline electrolytes. Poster: RadChem 2018 - 18th Radiochemical Conference, 13.05.-18.05.2018, Mariánské Lázně, Czech Republic

Wolter, J.-M., Schmeide, K., Huittinen, N., Stumpf, T.: Stability of U(VI) and Cm(III) doped calcium silicate hydrate phases in highly saline brines. Poster: 2nd Workshop on Calcium Silicate Hydrates containing Aluminium: C-A-S-H II, 23.04.-24.04.2018, Dübendorf, Schweiz

Fritsch, K.: Investigation of uranium(VI) retention by montmorillonite at high ionic strengths. Dissertation, Technische Universität Dresden (2018)

Poetsch, M.: Wechselwirkungs- und Transportuntersuchungen dreiwertiger Radiometalle in Ton unter Berücksichtigung des Einflusses von Fulvinsäure und erhöhten Salinitäten. Dissertation, Universität Leipzig (2018)

<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 11415C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 559.679,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Marquardt	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten (FuE) dieses Vorhabens befassen sich mit anwendungsbezogener, standortunabhängiger Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Entsorgung, insbesondere Wärme entwickelnder und langlebiger radioaktiver Abfälle. Sie haben zum Ziel, wissenschaftlich-technische Grundlagen zur Realisierung eines Endlagers für radioaktive Abfälle bereitzustellen, den Stand von Wissenschaft und Technik ständig weiterzuentwickeln sowie zum Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung in Deutschland beizutragen. Im Rahmen des Projekts wird das geochemische Verhalten von Actiniden in simulierten Grundwässern bzw. Porenwässern, die im Kontakt mit Betonbauwerken stehen, untersucht. Hierbei wird zum einen die Actinidwechselwirkung mit gelösten organischen Komplexbildnern wie z. B. den bei der Betonherstellung verwendeten Plasticizern und Superplasticizern untersucht. Des Weiteren wird die Actinidsorption an Tonmineralphasen in Gegenwart anionischer Liganden ( $\text{CO}_3^{2-}$ , Gluconat, Citrat) quantifiziert. Anhand experimenteller Daten werden geochemische Modelle entwickelt sowie Daten und Parameter abgeleitet, die für Sicherheitsanalysen Verwendung finden können.

Die Arbeiten finden in enger Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, den Universitäten Mainz, Potsdam, Heidelberg, Köln, Saarbrücken sowie der TU Dresden und TU München statt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Radionuklidrückhaltung im System Zement-, Zementkorrosionsprodukten bei mittleren bis hohen Ionenstärken
- AP2: Radionuklid-Rückhaltung durch Sorption am Tonmineral Illit bei mittleren bis hohen Ionenstärken
- AP3: Thermodynamische Modellierung:
- AP4: Methodenentwicklung: Analytik, Spektroskopie, Quantenchemie

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des AP1 wurden detaillierte Studien zur Löslichkeit von Th(IV) in Anwesenheit von Gluconat (GLU) und Citrat (CIT) als organische Zementadditive bzw. Modellliganden durchgeführt. Für die meisten Proben sind die Probennahmen abgeschlossen; es wurden 4 Probennahme-Kampagnen in einem Zeitraum von 240 Tagen durchgeführt. Lediglich für die pH-abhängigen Löslichkeitsexperimente für Th(IV) in Gegenwart von GLU steht die letzte Probennahme noch aus.

Nach der dritten Probennahme, die nach ca. 170 Tagen erfolgte, war immer noch ein Anstieg der Thorium-Löslichkeit zu erkennen, nach der vierten Probennahme (240 Tagen) verändern sich die Konzentrationen nicht mehr. Jetzt können die löslichkeitsbestimmenden Festkörper mittels XRD und SEM-EDX untersucht und ein thermodynamisches Modell entwickelt werden.

Die Screening-Löslichkeitsexperimente für U(VI) in Anwesenheit von GLU und CIT zeigen einen im Vergleich zu den entsprechenden Th(IV)-Experimenten geringeren Einfluss dieser beiden Liganden. Im Falle von Np(V), das eine geringere effektive Ladung als U(VI) aufweist, wird erwartet, dass der Einfluss von GLU und CIT auf die Löslichkeit noch um einiges geringer sein wird. Aus diesem Grund wird vorerst auf die ursprünglich geplanten Np(V)-Löslichkeitsexperimente verzichtet. Stattdessen werden die Th(IV)-GLU- und Th(IV)-CIT-Systeme, für die ein deutlicher Einfluss der Liganden auf die Th(IV)-Löslichkeit beobachtet wurde, detaillierter untersucht. Anhand zusätzlicher experimentell gewonnener Datenpunkte soll eine umfassende thermodynamische Modellierung der Th(IV)-GLU- und Th(IV)-CIT-Wechselwirkung erfolgen.

Im Rahmen von AP2 wurden Sorptionsexperimente von Eu(III) mit dem Tonmineral Montmorillonit unter den gleichen Bedingungen begonnen wie sie bereits für Illit durchgeführt wurden: 1 g/L NaSWy-2, Anwesenheit von 0.01 M GLU, verdünnte bis konzentrierte NaCl-Lösungen (0.1, 1, 3 M NaCl). Um das Sorptionsverhalten möglichst vollständig abzubilden, wurden Experimente in einem pH-Bereich von pH = 3-12.5 angesetzt. Über den gesamten pH-Bereich ist kein signifikanter Einfluss der Ionenstärke auf die Sorption zu beobachten. Unter den experimentellen Bedingungen ist im pH-Bereich pH=3-6,5 eine Na(I)-Eu(III) Kationenaustauschreaktion nicht zu beobachten. Die Eu(III)-Sorption steigt in diesem Bereich mit zunehmendem pH-Wert von  $\log K_D = 1.5$  auf  $\log K_D = 3.5$  für alle Ionenstärken linear an, wobei die  $K_D$ -Werte gegenüber dem reinen NaCl-System ohne organischen Ligand um ca. einen Faktor 10 erniedrigt wird. Ab pH 6.5 vermindert sich die Sorption leicht, um ab pH 9.5 erneut anzusteigen (max.  $\log K_D = 3.8$  bei pH 11). Generell ist die Sorption ab pH 6.5 gegenüber dem reinen NaCl-System stark vermindert ( $\sim \Delta \log K_D = 3$ ). Zu bemerken ist, dass der Verlauf der Eu(III)-Sorption an Montmorillonit und Illit als Funktion des pH-Wertes in 0.01 M GLU sehr ähnlich ist. Die Sorptionsstudien unter Variation der GLU-Konzentration im pH-Bereich 9 – 12 und 0.1 M NaCl zeigen, dass ab  $[GLU] \leq 1 \times 10^{-4}$  M die Eu(III)-Sorption nicht beeinflusst wird.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Durchführung der letzten Probennahme der pH-abhängigen Th(IV)-GLU-Proben in NaCl und CaCl<sub>2</sub>.
- Charakterisierung der gebildeten Festkörper von ausgewählten Proben mittels SEM-EDX, XRD etc.
- Modellierung der Löslichkeitsexperimente von Th(IV) in Anwesenheit von CIT und GLU.
- Fertigstellung eines Manuskripts für die Th(IV)-, U(VI)- und Nd(III)-Screeningexperimente und zwei weiteren Publikationen: 1: Thermodynamik von Th(IV)-GLU, 2: Thermodynamik von Th(IV)-CIT.
- Spektroskopische Untersuchung (TRLFS) der Cm(III)-Sorption an Illit und Montmorillonit in Anwesenheit von GLU in NaCl und CaCl<sub>2</sub> Elektrolyt-Lösungen.
- Geochemische Modellierung der Sorption von Eu(III)/Cm(III) an Montmorillonit und Illite in Anwesenheit von GLU

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<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 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 458.021,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kickelbick

## 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 Zementzusätzen (beispielsweise Glenium 51) 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 Tönen durchgeführt. Hierzu werden Opalinuston sowie Ca-Bentonit (Calcigel), der als Puffer-Material und Bohrlochverschluss im Endlagerkonzept vorgesehen ist, eingesetzt. Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung der Rückhaltung bzw. Mobilität endlagerrelevanter Elemente (bzw. Elementgemische in einer dem Endlagerinventar entsprechenden Zusammensetzung) im Ton 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

UdS-API (Verbund AP1 und AP4)

- Untersuchung der Zusammensetzung von Zementporenwasser (CPW) mittels Auslaugversuchen, Definition und Herstellung von synthetischem Zementporenwasser (ACW) für weitere Untersuchungen

UdS-APII (Verbund AP2 und AP4)

- Untersuchung der Wechselwirkung von ACW mit Ton (Batch-Versuche mit Opalinuston und Calcigel), Analyse des Korrosionsprozesses von Ton durch hoch-pH und ACW

UdS-APIII (Verbund AP2)

- Untersuchung der Sorption von endlagerrelevanten Elementen an unverändertem und verändertem Ton („aged clay“) in Anwesenheit von ACW (Batch-Versuche)

UdS-APIV (Verbund AP2 und AP4)

- Wechselwirkung von CPW bzw. ACW mit Ton bzw. Tongemischen (OPA, Ca-Bentonit) mittels Miniatur-Säulen-Experimenten (MSE)

UdS-APV (Verbund AP1 und AP4)

- Untersuchung des Einflusses organischer Additive im Eluat aus Korrosionsprozessen auf die Retardation bzw. Mobilisierung von endlagerrelevanten Metallen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Untersuchungszeitraum konnten die Untersuchungen zur Rückhaltung der Elemente im Gemisch („Waste Cocktail“: Analytgemisch aus Uranyl, Eu(III), Cs(I) und Iodid) an Opalinuston (OPA) abgeschlossen werden. Mit dem Waste Cocktail (WC) wurden Untersuchungen bei pH 13 (in 0,1, 1, 5M NaCl-Lösung und in synthetischem Zementporenwasser, kurz ACW) durchgeführt, da das Iodid durch Ansäuern der Lösung zu flüchtigen Iod umgewandelt werden kann. Liegt Iodid im WC vor, erhöht sich der beobachtete Rückhalt gegenüber den Einzelmessungen. Es ist jedoch bislang ungeklärt, ob hier wirklich Rückhalt eine Rolle spielt oder doch eine Oxidation zu flüchtigem Iod, was eine Rückhaltung vortäuscht. Beim Cs(I) bleibt der Gang im Gemisch erhalten, d. h. je höher die Ionenstärke ist, umso niedriger wird der Rückhalt ( $\log K_d$  nimmt ab von 2,6 in 0,1M auf 1,8 in 5M NaCl). Relevante Unterschiede zwischen den Untersuchungen im Gemisch und den Einzelementen (EE) sind für Cs(I) nicht zu beobachten. Der Eu(III) Rückhalt ändert sich im Elementgemisch im Vergleich zu den Experimenten mit den Einzelementen kaum. Im Gegensatz dazu nimmt der Rückhalt von Uranyl im Gemisch signifikant zu und ist unabhängig von der Ionenstärke, nur Untersuchungen im ACW führen zu einer starken Erhöhung des Rückhaltes. Die Untersuchungen des WC an Calcigel sind den Untersuchungen an OPA recht ähnlich. Der beobachtete Iodid Rückhalt nimmt von den Einzeluntersuchungen zu den Untersuchungen im WC deutlich zu ( $\log K_{d(WC)} = 1,6$ ,  $\log K_{d(EE)} = 0,9$ ). Die Ergebnisse von Cs(I) zeigen keine Unterschiede zwischen WC und EE, liegen mit Calcigel jedoch bei höheren Ionenstärken niedriger als mit Opalinuston (Abnahme  $\log K_d$  von 2,6 in 0,1M auf 1,3 in 5M NaCl). Die Untersuchungen von Eu(III) und Uranyl an Calcigel im WC zeigen keine signifikanten Unterschiede zu denen am OPA.

Im Berichtszeitraum wurden weiterhin mit der in den vorhergehenden Berichten bereits beschriebenen HPLC-ICP-MS-Kopplung Miniatur-Säulen-Experimente (MSE) durchgeführt. Bei Injektionen des WC mit verdünnter Gipshuttlösung als Eluent kommt es sowohl zur Konkurrenz der injizierten Spezies untereinander (vgl. Ergebnisse aus Batch-Experimenten im 2. Halbjahresbericht 2017) als auch zur Wechselwirkung der Analyten mit den kompetitiven Bestandteilen der Gipshuttlösung (mehrwertige Kationen sowie hohe Konzentration an einwertigen Ionen). Iodid als anionische Spezies passiert die Minisäule weitestgehend ungehindert und kann als Referenzmarker für den Zeitpunkt der Injektion genutzt werden. Wie erwartet findet keine Sorption des Iodids am OPA statt. Uranyl liegt als anionische bis neutrale Spezies vor und zeigt unter diesen Bedingungen und der starken Konkurrenz durch die Gipshuttlösung ebenfalls keine Sorption und keine Retention. Cäsium als einfach positives Kation wird nicht nennenswert sorbiert, zeigt aber eine signifikante zeitliche Verzögerung (Retention) im Vergleich zum Iodid-Marker. Für Eu(III) lässt sich zunächst eine vollständige Rückhaltung an OPA verzeichnen. Erst im weiteren Verlauf tritt ein allmählicher Durchbruch mit einer von Injektion zu Injektion ansteigenden Menge an durchtretendem Eu(III) auf. Schließlich wird ein Plateau erreicht und die Menge an Eu(III), das nach der Säule detektiert wird, bleibt pro Injektion konstant. Aus der zeitlichen Verzögerung des Eu(III)-Peaks kann der Retardationsfaktor ( $R_f$ ) für Eu(III) (in Gegenwart von co-injiziertem Uranyl, Cs(I) und Iodid an OPA mit verdünnter Gipshuttlösung als Elutionsmittel) zu  $R_{f(Eu)} = 1,32 \pm 0,02$  ( $n=3$ ) bestimmt werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im nächsten Untersuchungszeitraum werden die Restarbeiten zu den Arbeitspaketen UdS-APIII und UdS-APIV abgeschlossen. Daneben werden die Untersuchungen für die Projekt-Verlängerung vorbereitet und im Verlängerungszeitraum (ab September 2018) begonnen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Boulard L., Kautenburger R. (2018): Short-term elemental release from Portland cement concrete by hypersaline leaching conditions. *Advances in Cement Research* (im Druck); <https://doi.org/10.1680/jadcr.18.00085>

Kautenburger R., Brix K., Hein C., Sander J.M. (2018): Metal speciation and mobility in clay - From ICP-MS batch and CE-ICP-MS speciation to miniaturised clay column experiments (MCCE) using LC-ICP-MS. *Book of Abstracts, European Mass Spectrometry Conference EMSC 2018* (Saarbrücken), S. 330 (Vortrag)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11415E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 476.760,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Krüger	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Vorhabensziele:

- Quantenmechanische Modellierung der Sorption von Actiniden an C-S-H-Phasen
- Quantenmechanische Modellierung der Komplexbildung von Actiniden in basischen Lösungen

Bezug zu anderen Vorhaben:

Teilprojekt im Verbund „Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen“ GraZ

Komplementär zum BMBF-Verbundprojekt ThermAC

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm umfasst folgende Arbeitspakete (AP):

AP1: Wechselwirkung von Actiniden mit C-S-H-Phasen

AP2: Actinidenkomplexe in basischen Lösungen

AP3: Unterstützung spektroskopischer Experimente

AP1 umfasst quantenmechanische Berechnungen periodischer Modelle von C-S-H-Phasen und die Untersuchungen der Wechselwirkung von Actinidenspezies mit diesen.

In AP2 werden Hydroxid- und Carbonatkomplexe von Actiniden in basischer wässriger Lösung sowie ihre Wechselwirkung mit Lösungskationen und Modellen von Zementadditiven untersucht.

AP3 ist der Unterstützung der Interpretation spektroskopischer Experimente im Verbund durch die Berechnung entsprechender Parameter gewidmet.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.3: Sorption an C-S-H-Phasen; AP2.1: Hydroxide und Carbonate; AP2.2: Ternäre Komplexe mit Lösungskationen.

Modellierungen zur Sorption von Uran an 14-Å-Tobermorit als C-S-H-Modell (AP1.3) wurden für U(VI) weitergeführt und um U(IV) erweitert. Die Untersuchung der Sorption von U(VI) in der Zwischenschicht wurde um  $C/S = 1$  ergänzt. Für alle Substratmodelle wurden auch Plätze an fehlenden verbrückenden Si-Tetraedern betrachtet, um die Variabilität der C-

S-H-Phasen einzubeziehen. Diese Rechnungen bestätigen, dass bevorzugte Sorptionsplätze mit C/S variieren. Unter den stabileren Plätzen sind Plätze an Leerstellen der Dreierketten stabiler als entsprechende Plätze an defektfreien Dreierketten. Damit dürfte die Sorption von U(VI) mit der Länge der Dreierketten korrelieren. Die Sorption von U(IV) in der Zwischenschicht von Tobermorit wurde ausgehend von U(VI)-Spezies mit  $U(OH)_2^{2+}$  als Ausgangsstruktur modelliert. Geometrieoptimierungen zeigen, dass  $U(OH)_2^{2+}$  ähnliche Sorptionskomplexe mit der Koordinationszahl 6 bildet wie U(VI). Energiedifferenzen verschiedener Sorptionskomplexe sind für U(IV) niedriger als für U(VI). Bevorzugte Plätze sind für beide Ionen und gegebene C/S-Werte gleich. Derzeit werden die U(IV)-Komplexe mit einem dynamischen Verfahren äquilibriert, um ihre Stabilität zu prüfen und um bessere Energien zu erhalten. Ergebnisse für C/S = 0.67 zeigen Koordinationszahlen von 6-8, was besser mit dem Experiment übereinstimmt. Strukturen von adsorbiertem (IV) wurden in guter Übereinstimmung mit EXAFS-Ergebnissen der Projektpartner für Np(IV) und Pu(IV) berechnet. Für U-Si-Abstände wurde eine Verteilung gefunden, die die gemessenen Werte einschließt. Der Vergleich mit U(VI) erlaubt eine Abschätzung des entsprechenden Redoxpotentials von sorbiertem Uran. Derzeit werden Rechnungen zur Sorption von U(VI) an der Kantenfläche (100) des Tobermorits durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf wurden Modellierungen des Komplexes  $[(UO_2)_4(OH)_7]^+$  (AP2.1) um ein Isomer mit zwei zentralen  $\mu_3$ -Liganden ergänzt, das sich als relativ stabil erwies. Weitere Rechnungen zu einkernigen U(IV)-Hydroxokomplexen (AP2.1) bestätigen eine Erniedrigung der Koordinationszahl mit wachsender Zahl von OH-Liganden bis zur Spezies  $U(OH)_6^{2-}$ . Energieabschätzungen lassen anionische Spezies bis hin zu  $U(OH)_7^{3-}$  als möglich erscheinen.

Arbeiten zu ternären Komplexen mit Lösungskationen (AP2.2) wurden fortgeführt. Für den Komplex  $Ca_4U(OH)_8^{4+}$  wurde eine verzerrte flach-prismatische Struktur gefunden. Die neutrale Spezies  $Ca_2U(OH)_8^0$  erwies sich um etwa 100 kJ/mol weniger stabil. Für den vom Projektpartner INE Karlsruhe experimentell untersuchten analogen Komplex  $Th_4U(OH)_8^{4+}$  wurden etwas längere Th-OH-Bindungen und ein um 18 pm kürzerer Abstand Th-Ca im Vergleich zu EXAFS-Daten berechnet. Es bleibt zu untersuchen, ob diese Unterschiede auf die fehlende explizite Solvatisierung der Modellkomplexe zurückzuführen sind.  $Ca_4U(OH)_8^{4+}$  zeigt gegenüber dem Th-Komplex eine um 10 pm kürzere Bindung U-OH, was den Unterschied der Radien der Aktinoidenionen übersteigt. Rechnungen zum bekannten Komplex  $Ca_2UO_2(CO_3)_3^0$  wurden durch eine dynamische Simulation mit expliziter Solvation ergänzt. Diese bestätigt eine leicht asymmetrische Struktur des Komplexes, die in ähnlichen Modellierungen gefunden wurde.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1.3: Sorption an C-S-H-Phasen

AP2.1: Hydroxide und Carbonate

AP2.2: Ternäre Komplexe mit Lösungskationen

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Kremleva, S. Krüger, N. Rösch: Sorption of U(VI) by Calcium Silicate Hydrate (CSH) Phases, in High Performance Computing in Science and Engineering, Hrsg. P. Bastian, D. Kranzlmüller, H. Brühle, M. Brehm, Bayerische Akademie der Wissenschaften, 2018, S. 86

<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 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 339.580,00 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)  
- 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



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Sorptionszeit- und  $pH$ -Wert- ( $11 \leq pH \leq 12.6$ ) abhängigen, Lumineszenz-basierten Analysen der Eu(III)-Sorption an AFm-CO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub> wurden beendet. Es bildeten sich ein Eu(III)-Hydroxid und ein Oberflächensorbat. Für  $pH \geq 12$  wurde ( $pH$ -Wert und Sorptionszeit-abhängig) zusätzlich eine in AFm-CO<sub>3</sub> eingebaute Spezies gefunden. Für AFm-SO<sub>4</sub> wurde der Einbau nur bei  $pH = 12.6$  nach über 150 Tagen beobachtet.

Die Untersuchung des Einflusses verschiedener Ionen (NaCl, Gipshut-Lsg., CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) auf die Eu(III)-Sorption an CSH (C/S = 0.7 und 1.3) bei  $pH = 12.0$  wurden fortgesetzt.

Es wurde der Einfluss organischer Zementzusätze auf den frühen Hydrationsprozess (1h - 24 h und 28 d) eines Gemisches aus 86 % Portland-, 10 % Calcium-Aluminat-Zement und 4 % CaSO<sub>4</sub> spektroskopisch untersucht (Kooperation BAM). In Kooperation mit dem KIT wurde Eu(III) an eine nm-dicke CSH-Schicht auf einem temperierten Si-Wafer (6 h,  $60 \text{ °C} \leq T \leq 200 \text{ °C}$ ) sorbiert. Die Lumineszenzdaten zeigten für die bis zu 150 °C temperierten Wafer die Bildung von Eu(III)-Hydroxid, Eu(III)-Carbonat und einer eingebauten Eu(III)-Spezies.

Untersuchungen zur Abstandsverteilung von an CSH sorbiertem Eu(III) mittels Inter-Lanthanoid-Energietransfers (Eu(III)/Nd(III)) wurden angefangen. Begonnene Referenzexperimente zur Eu(III)-Sorption an CaO bzw. SiO<sub>2</sub> dienen zum Verständnis der Sorption an CSH.

Durch eine PARAFAC-Analyse konnten für die einzelnen, an CSH (C/S = 1.3,  $pH = 12$ ) sorbierten Eu(III)-Spezies, Lumineszenzspektren ermittelt werden. Aus den Geschwindigkeitskonstanten für die Sorption von Eu(III) an CSH (C/S = 1.3,  $pH = 12$ ) folgt, dass der Einbau von Eu(III) in CSH deutlich schneller erfolgt als die Rückreaktion.

Die Sorptionszeit- sowie Ionenstärke-abhängigen (Milli-Q-Wasser, NaCl, Gipshut-Lsg.) Lumineszenz-kinetischen Untersuchungen der Eu(III)-Sorption an Ca-Montmorillonit ( $10 \leq pH \leq 12$ ) wurden abgeschlossen. Es konnte für  $pH = 10$  bzw. 11 (nicht für  $pH = 12$ ) ein Oberflächensorbat sowie Eu(III)-Hydroxid identifiziert werden. Es konnte weder eine Abhängigkeit vom  $pH$ -Wert noch vom Hintergrundelektrolyten festgestellt werden.

Erste Transienten-Absorptionsmessungen von UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> bei  $pH = 0$  in 1 M ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> und Cl<sup>-</sup>-Lösungen wurden durchgeführt. Es konnten zwei angeregte Zustände zeitlich und spektral beobachtet werden und deren energetische Lage sowie die vibronische Struktur höher angeregter Zustände gemessen werden. Außerdem konnte die Reduktion von Cl<sup>-</sup> durch angeregtes U(VI) zum Cl<sub>2</sub><sup>•-</sup>-Radikal und die Bildung von U(V) belegt werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im AP1 sollen die Arbeiten bezüglich des Inter-Lanthanoid-Energietransfers, die Referenzexperimente und die Analyse des Ionen-Einflusses abgeschlossen werden. Die AFm/Eu(III)-Phasen werden strukturell untersucht. Die PARAFAC-Analyse der Eu(III)-Spezies wird ausgedehnt. Die Sorption von niedrigem Eu(III) an CSH soll Lumineszenz-spektroskopisch analysiert werden.

Im AP2 werden die getrockneten Montmorillonit-Proben strukturell sowie tieftemperatur-spektroskopisch untersucht. Es soll der Einfluss von ausgefallten Eu(III)-Hydroxid-Spezies als mögliches Eu(III) Reservoir bei hohen  $pH$ -Werten durch analoge Methoden analysiert werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

K. Burek, F. Krause, M. Schwotzer, A. Nefedov, J. Suessmuth, T. Haubitz, M. Kumke, P. Thisen: "Hydrophobic properties of Calcium-Silicate-Hydrates doped with rare-earth Elements", ACS Sustainable Chemistry & Engineering eingereicht (2018)

T. Haubitz, S. Tsushima, R. Steudtner, B. Drobot, G. Geipel, T. Stumpf, M. U. Kumke: "Ultrafast transient absorption spectroscopy of UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> and [UO<sub>2</sub>Cl]<sup>+</sup>" The Journal of Physical Chemistry A eingereicht (2018)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11415G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2015 bis 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 239.258,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Stumpf	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Projekt befasst sich mit Arbeiten zum grundlegenden Prozessverständnis der Speziation von (dreiwertigen) Actiniden/Lanthaniden (An/Ln) in chemischen Medien, die sich aus Zementdegradationsprozessen ergeben sowie die Bedingungen potentieller deutscher Wirtsgesteine berücksichtigen, d. h. es werden alkaline Lösungen mit mittleren bis hohen Ionenstärken betrachtet. Es werden folgende Vorhabensziele definiert: a) Identifizierung relevanter organischer Zementadditive (Plastifizierer und Superplastifizierer, in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern), b) Bestimmung konsistenter thermodynamischer Datensätze zur Wechselwirkung der relevanten organischen Zementadditive mit redoxstabilen An/Ln in alkalinen Lösungen, c) Charakterisierung des Einflusses additivhaltiger CSH-Zementphasen auf die Actiniden-speziation, d) Erweiterung des bisherigen Wissenstandes zur Wechselwirkung von An/Ln mit Boratspezies in alkalinen Lösungen inklusive der Identifizierung von borathaltigen Sekundärphasen, e) Machbarkeitsstudie zur Sorptionskalorimetrie von Ln an endlagerrelevanten festen Phasen zur direkten Ermittlung von Sorptionsenthalpien

Das Forschungsvorhaben erfolgt in enger Kooperation mit den Projekten der Universitäten Mainz, Saarbrücken, München, Potsdam und Heidelberg sowie dem Institut für Ressourcenökologie vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf und dem Institut für Nukleare Entsorgung vom Karlsruher Institut für Technologie.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1.1: Thermodynamische Untersuchungen im System Ac/Ln-organische Zementzusatzstoffe in alkalischen Lösungen und künstlichen Zementporenwasser mit folgenden Schwerpunkten: Herstellung/Charakterisierung definierter CSH-Mineralphasen und Ettringit mit ausgewählten relevanten Additiven, Batchversuche zur Freisetzung und/oder Sorption von Additiven im binären System Zementadditiv-CSH-Mineralphase, spektroskopische und thermodynamische Charakterisierung löslicher Komplexspezies im binären System Actinid-Zementadditiv/Modellligand
- AP1.2: Untersuchungen im System Actinid-Borat-organische Zementadditive in alkalischen Lösungen mit folgenden Schwerpunkten: thermodyn. Charakterisierung der Wechselwirkung von Boraten mit Zementadditiv auf Polyolbasis (Boratesterbildung,  $\text{pH} > 7$ ), spektroskopische und thermodynamische Charakterisierung der Wechselwirkung von Ln/An mit den Boratestern
- AP4.1: Etablierung der isothermen Titrationskalorimetrie zur Bestimmung von Sorptionsenthalpien folgenden Schwerpunkten: Machbarkeitsstudie zur Sorptionskalorimetrie von Ln(III) mit Modellphasen (z. B.  $\text{TiO}_2$ ) als Funktion der Ionenstärke, Anpassung/Entwicklung entsprechender der Auswerteroutinen an die Spezifika der Sorption, sorptionskalorimetrische Untersuchungen mit Ln(III) an endlagerrelevanten Phasen (Ton, CSH-Phasen) als  $f(\text{pH}, I, \text{Medium})$

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### AP1.1:

Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) spektroskopische Untersuchungen von Am(III) und Am(III)-Malat dotierten CSH-Phasen mit einem C/S-Verhältnis von 0.4 bis 1.2 wurden an der ESRF in Grenoble durchgeführt und mittels iterativer Transformation Faktoranalyse (ITFA) ausgewertet. Es konnten drei strukturell unterschiedliche Am-Spezies identifiziert werden, wobei eine Spezies nur in Gegenwart von Malat und bei hohen C/S-Verhältnissen auftritt. Das verdeutlicht, dass Malat einen Einfluss auf die Am-Speziation in CSH-Phasen hat. Shell fits (beruhend auf einer Tobermorite-Struktur von Merlino et al., Eur. J. Mineral. 13, 577–590 (2001)) der EXAFS-Spektren der beiden Am-Spezies ohne Malat zeigen einen Einbau von Am in die CSH-Struktur anstelle eines Calcium-Ions.

TRLFS-Untersuchungen der Am-(Malat) dotierten CSH-Phasen ergaben eine deutlich verlängerte Am(III)-Fluoreszenzlebenszeit von  $\sim 200$  ns ( $n_{\text{H}_2\text{O}} = 0$ ), welche auf das Vorhandensein von einer oder mehreren, aber fluoreszenzspektroskopisch nicht unterscheidbaren eingebauten Am(III)-Spezies schließen lässt. Die Anwesenheit von Malat ergibt zudem eine Erhöhung der Fluoreszenzintensität im Vergleich zu den additivfreien Am(III) dotierten CSH-Phasen. Dies könnte auf eine oberflächlich sorbierte Am-(Malat) Spezies hinweisen. Sorptionsexperimente ergeben einen hohen  $K_d$ -Wert mit  $\log K_d \sim 4-5$  für die Sorption von Am(III) an den CSH-Phasen unabhängig von der Anwesenheit von Malat. Eine erhöhte Sorption von Malat (C-14 markiertes Malat) mit steigendem C/S-Verhältnis wurde festgestellt.

Begonnen wurde mit mikro-titrationskalorimetrischen Untersuchungen zur Komplexierung von Eu(III) mit weiteren Zementadditiven auf der Basis von Polycarboxylaten (zur Verfügung gestellt von AG Prof. Panak, Uni Heidelberg) in Abhängigkeit der Ionenstärke an NaCl, CaCl<sub>2</sub>. Erste Ergebnisse zeigen keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu analogen kalorimetrischen Untersuchungen mit Glenium51. Jedoch ist die Auswertung der titrationskalorimetrischen Wärmekurven nach wie vor schwierig, da die eigentliche Komplexierungsreaktion möglicherweise von einer weiteren, bisher nicht identifizierten Reaktion des PCE's überlagert wird.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Fortführung der strukturellen Untersuchungen von Eu/Am(III) bzw. Eu/Am(III)-Malat dotierten CSH-Phasen mittels spektroskopischer Methoden (u. a. TRLFS) sowie TGA-DSC und XRD-Messungen, abschließende Auswertung der EXAFS-Untersuchungen an den Am-Malat dotierten CSH-Phasen
- Weitere Experimente zur Sorption/Auslaugung (Batchexperimente) von Eu(III) bzw. Eu(III)-Zementadditiven unter Verwendung von Eu-152 und C-14 markiertem Malat und vergleichend mit Tartrat unter Variation der Bedingungen (Ionenstärke, Hintergrundelektrolyt) sind geplant.
- Herstellung von Calcium-Aluminat-Hydratphasen und Durchführung von ersten Batchsorptionsexperimenten mit Eu, Malat und Tartrat
- Fortführung der mikro-titrationskalorimetrischen Charakterisierung der Komplexierung von Eu(III) mit verschiedenen PCE's

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Posterbeitrag: F. Taube, M. Acker, A. Rossberg, Th. Stumpf: Investigation on the intercalation of An(III)/Ln(III) Malate complexes in CSH Phases. 2<sup>nd</sup> Workshop of Calcium-Silicate Hydrates Containing Aluminium C-A-S-H II, Dübendorf, Schweiz, 22-23.04.2018

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Seminarstr. 2, 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 31.08.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 352.934,00 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: Einfluss von organischen Zementadditiven auf den Quellterm von trivalenten Actiniden.
- AP2: Komplexierung von dreiwertigen Actiniden mit organischen Zementadditiven.
- AP3: Weiterentwicklung von spektroskopischen Methoden zur Anwendung auf saline Systeme unter zementrelevanten Bedingungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Um das Komplexierungsverhalten der Polycarboxylat-Superplasticizer besser verstehen zu können, wurden TRLFS Untersuchungen zur Wechselwirkung von Eu(III) mit Polyacrylat durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Fehlen der Poly(ethylenglykol)ketten sich nicht signifikant auf die Stabilitätskonstanten der gebildeten Eu(III)-Komplexe auswirkt. Ähnlich wie für die Polycarboxylate Glenium® 51 ( $\log \beta'(T) = 7.5-7.9$ ) und 52IPEG4,5 ( $\log \beta'(T) = 6.5-5.9$ ) sowie verschiedene Fulvinsäuren ( $\log \beta'(T) = 5.6-7.0$ ), liegen auch die Stabilitätskonstanten für das einfache Polyacrylat in einem Bereich zwischen 5.5 und 6.1. Die Datenlage lässt noch keine Aussage über die Temperaturabhängigkeit der Komplexierungsreaktion zu, dennoch deuten die Ergebnisse daraufhin, dass das Komplexierungsverhalten komplexer Polycarboxylate anhand von Experimenten mit einfachen Polymeren abgeschätzt werden könnte. Hinsichtlich des anzuwendenden Landungsneutralisationsmodell bieten diese einfachen Polymere den Vorteil, dass die Kationenaustauschkapazität auf Grund der simplen Struktur anhand der molaren Masse der monomeren Einheit abgeschätzt werden kann und keine Ladungstitrations nötig ist.

EXAFS Ergebnisse zur Wechselwirkung des Superplasticizers 52IPEG4,5 mit verschiedenen Lanthaniden (Nd, Eu, Gd, Tb) zeigen, dass in allen Fällen das dreiwertige Lanthanidion im neutralen pH Bereich von drei Carboxylfunktionen des Polymers koordiniert wird. Die Bindungsabstände deuten darauf hin, dass die funktionellen Gruppen bidentat „end-on“ an das Metallion binden und keine Chelatkomplexe gebildet werden. Mit steigender Ordnungszahl der Lanthaniden ist zudem die zu erwartende Vergrößerung der Bindungsabstände erkennbar. Diese Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Strukturdaten, die für die entsprechenden Glenium® 51 Komplexe erhalten wurden. Spektroskopische Daten zur Wechselwirkung mit den Polycarboxylaten MPEG 45PC6 und 45PC2 befinden sich noch in der Auswertung.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Fortsetzung der Kooperation mit AG Plank (TUM).
- TRLFS Untersuchungen zur Komplexierung von Cm(III) mit kleinen und polymeren organischen Liganden als potentielle Abbauprodukte komplexer Superplasticizer.
- TRLFS Untersuchungen ausgewählter Ligandsysteme bei höheren pH-Werten.
- Erste Untersuchungen zur Komplexierung von Np(V) mit kleinen organischen Liganden (Carboxylate, Dicarboxylate).
- Bestrahlung von verschiedenen Superplasticizern zur Identifikation potentieller radiolytischer Abbauprodukte.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Fröhlich, D.R., Panak, P.J.: A thermodynamical study on the complex formation of Cm(III) with methacrylate, *Appl. Geochem.*, 2018, 92, 104-109

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolf-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11425</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken – Bautechnische Realisierung Technikumsprüfstand mit Durchführung und Auswertung erster Versuche (Salzschnittblöcke)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2015 bis 31.07.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.241.071,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr.-Ing. Düsterloh	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Bautechnische Realisierung eines im Vorhaben FKZ 02E11223 ausgelegten Technikumsprüfstandes und Durchführung und Auswertung erster Versuche zur Eignung von Abdichtungselementen aus Steinsalzschnittblöcken mit Fugenfüllung zur langzeitsicheren Abdichtung eines Endlagers im Steinsalz.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Erstellung der Ausschreibungsunterlagen und Einholung aktualisierter Angebote.
- AP2: Vorbereitung der Versuchshalle für die bautechnische Realisierung des Technikumsprüfstandes.
- AP3: Bautechnische Realisierung und Synthese der Anlagenkomponenten mit Testläufen zur Funktionalität und Anlagensicherheit.
- AP4: Beschaffung von gewachsenem Steinsalz.
- AP5: Herstellung von Salzschnittblöcken.
- AP6: Untersuchungen zur hydraulisch dichten Ummantelung der Großprüfkörper.
- AP7: Durchführung und Auswertung von Technikumsversuchen unter variierten THM-Beanspruchungen.
- AP8: Erstellung numerischer Berechnungsmodelle zur THM gekoppelten Reanalyse.
- AP9: Rechnerische Reanalyse der Technikumsversuche mit Verifikation und Validation.
- AP10: Erstellung Schlussbericht.

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

AP1, AP2, AP3, AP4, AP6, AP7, AP8 und AP9 sind abgeschlossen.

AP5: Erstes Abdichtungselement aus 375 Schnittblöcken fertig gestellt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP10: Erstellung des Abschlussberichts.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11435</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl <sub>2</sub> -Lösung (MgO-SEAL)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2015 bis 30.11.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.081.938,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kudla	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

MgO-Beton ist als Baustoff für zukünftige Verschlussbauwerke in einem HAW-Endlager im Salinar vorgeschlagen worden. Das Vorhaben MgO-SEAL dient dem Ziel, das Langzeitverhalten von MgO-Spritzbeton nach Lösungskontakt im Maßstab eines realen Bauwerks zu bewerten. Genutzt wird dazu, dass aus Spritzbeton der Rezeptur D4 (5-1-8-Bindemittelphase) in der Grube Teutschenthal errichtete Dammbauwerk GV2 nach einer Standzeit von 7 Jahren. Das Forschungsvorhaben ist ein Beitrag zum Langzeitsicherheitsnachweis von Verschlusselementen aus MgO-Beton mit der 5-1-8-Bindemittelphase für zukünftige HAW-Endlager im Salinar.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Voruntersuchungen, pneumatische Dichtheitsprüfung, Einrichtung des Versuchsortes GV2.
- AP2: Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus dem MgO-Beton (Phasenbestand, Festigkeits- und Kriechverhalten, Porosität, Permeabilität).
- AP3: Lösungsangriff (hydraulische Druckbeaufschlagung GV2) über lange Bohrlöcher und über die vorhandene Druckkammer.
- AP4: Planung des selektiven Rückbaus und Nachuntersuchungen.
- AP5: Interpretation der Versuchsergebnisse und Empfehlungen für die Gestaltung von Verschlussbauwerken aus MgO-Spritzbeton.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Arbeiten sind abgeschlossen.
- AP2: Erste Ergebnisse der Mikro-Computertomographie ( $\mu$ CT) an einem Bohrkern aus MgO-Spritzbeton aus dem Versuchskörper GV2 liegen von HZDR (Reactive Transport Division) vor. Insgesamt sind die Zuschlagkörner orientiert und größere Poren (mm-Bereich) gruppieren sich in der Nähe der Körner. Größere Poren wurden möglicherweise durch die Hg-Porosimetrie mit kleinerem Porendurchmesser ("Flaschenhals") abgebildet. Die Poren erscheinen blasenartig, anscheinend mit einem unvernetzten Porenraum. Mikroporen ( $< 30 \mu\text{m}$ ) sind anscheinend im Bindemittel enthalten.
- AP3: Bei konstanter Flüssigkeitsdruckbelastung des GV2-Bauwerkes von 2,15 bar sank der Volumenstrom auf 0,005 l/h, bei konstantem Flüssigkeitsdruck von 3 bar stellten sich 0,02 l/h ein. Dies entspricht bei konservativer Betrachtung einer Eindringrate von  $3\text{E-}10$  m/s bei 2,15 bar und von  $8\text{E-}10$  m/s bei 3 bar Flüssigkeitsdruck. Eine Reaktion der Messebene der Feuchtesensoren (6,7 m von der Druckkammer) oder ein Durchfluss wurden nicht beobachtet.
- AP4: Die früher mit Lösung belastete Bohrung B34 wurde mit einem Durchmesser von 300 mm überbohrt. An den gewonnenen Proben, wurde die Umwandlung der 5-1-8-Phase und des Rest-MgO in die 3-1-8-Phase durch ortsaufgelöste Röntgenphasenanalyse nachgewiesen und gezeigt, dass die Lösung ca. 2 cm in den MgO-Beton eingedrungen ist. Die vollständige Umwandlung erfolgte bis zu einer Tiefe von 1 cm. Im Bereich zwischen 1 cm und 2 cm Eindringtiefe ist noch anteilig 5-1-8-Phase nachweisbar.
- AP5: Durch Zugabe von Feinsalz wurde nicht die gewünschte Viskositätserhöhung der Bindemittelsuspension erreicht. Erfolgsversprechender sind die Erhöhung des MgO-Anteils und der Einsatz von MgO-Sorten mit höherer BET-Oberfläche.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Lokale (präferentielle) Transportwege im MgO-Beton und der Einfluss großer Poren auf den Lösungstransport können perspektivisch mittels PET aufgeklärt werden.
- AP3: Belastung der Druckkammer GV2 bei einem konstanten Flüssigkeitsdruck von 5 bar. Ultraschallmessungen der BAM am GV2 mit dem LAUS-Gerät (im Auftrag der BGE).
- AP4: Abschluss der Arbeiten.
- AP5: Abschluss der Arbeiten. Fertigstellung des Entwurfs des Abschlussberichtes

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<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 30.06.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 330.429,00 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).

Zu den in AP1 vom IfG durchgeführten und im Berichtszeitraum von allen Partnern nachgerechneten Kriechversuchen gehörte ein Test, der gezeigt hat, dass die anfängliche Konsolidierungsphase von bisher 10 Tagen auf mindestens 100 Tage ausgedehnt werden muss, um den Einfluss einer Vorschädigung weitgehend reduzieren zu können. Dies ist insbesondere in künftigen Versuchen bei kleinen Deviatorspannungen zu berücksichtigen, in denen eine Vorschädigung das Ergebnis nennenswert verfälschen kann. In AP2 setzte der ZE die Berechnungen diverser Verheilungsversuche fort und verglich die Ergebnisse mit den inzwischen vorliegenden Laborversuchsdaten. Derartige Vergleiche liefern allen Partnern wertvolle Hinweise für die Überprüfung und Weiterentwicklung bestehender Modellierungsansätze. In AP3 wurden Modellberechnungen aus dem letzten Verbundprojekt zum HFCEP-Versuch, d. h. der Erhitzung und Abkühlung eines Asse-Bohrlochabschnitts sowie zu Room D der WIPP wiederholt. Dabei wurde diesmal die Schädigungs- und Dilatanzentwicklung aufgrund von Zugspannungen berücksichtigt. Es zeigte sich, dass dieser Einfluss bei der Berechnung der Schädigungszone (DRZ) nicht vernachlässigt werden darf. Schließlich wurden in AP5 die Berechnungen zum Virtuellen Demonstrator fortgeführt.

Im Berichtszeitraum beteiligte sich der ZE an folgenden Projektworkshops: Nr. 10 am 12.-16.03. in Albuquerque und Carlsbad, NM, USA, Nr. 11 am 19.-20.04. in Braunschweig sowie Nr. 12 am 29.-30.05. und Nr. 13 am 13.06.2018 in Clausthal.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Der Zuwendungsempfänger wird zusammen mit den Partnern die weiteren gemeinsam definierten Arbeiten durchführen. Im Fokus stehen dabei in AP2 Vorausberechnungen von weiteren Verheilungsversuchen. Die Ergebnisse werden mit Daten aus begleitend von der TUC durchgeführten Versuchen verglichen. In AP3 stehen Vergleiche der Berechnungsergebnisse der Partner zur Wirkung von Zugspannungen im Salz und in AP5 weitere Simulationen des Virtuellen Demonstrators auf dem Programm.

Auf den weiteren Projektworkshops werden die Partner ihre Ergebnisse präsentieren und die daraus folgenden Arbeiten festlegen. Workshop 14 ist für den 08.-09.09.2018 in Goslar geplant. Anschließend wird der ZE Ergebnisse des Verbundes auf dem 9th US-German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation (10.-11.09.) und auf der Saltmech IX (12.-14.09.) in Hannover präsentieren.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Herchen, K., T. Popp, U. Düsterloh, K.-H. Lux, K. Salzer, C. Lüdeling, R.-M. Günther, C. Rölke, W. Minkley, A. Hampel, S. Yildirim, K. Staudtmeister, A. Gährken, J. Stahlmann, B. Reedlunn & F.D. Hansen (2018): WEIMOS: Laboratory Investigations of Damage Reduction and Creep at Small Deviatoric Stresses in Rock Salt. \*)

Lüdeling, C., K. Salzer, R.-M. Günther, A. Hampel, S. Yildirim, K. Staudtmeister, A. Gährken, J. Stahlmann, K. Herchen, K.-H. Lux, B. Reedlunn, S. Sobolik, F.D. Hansen & S.A. Buchholz (2018): WEIMOS: Joint Project on Further Development and Qualification of the Rock Mechanical Modeling for the Final HLW Disposal in Rock Salt – Overview and First Results on Tensile Stress Modelling. \*)

\*) S. Fahland, J. Hammer, F.D. Hansen, S. Heusermann, K.-H. Lux & W. Minkley (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt IX, Proc. 9th Conference, Hannover, 12.-14. September 2018, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISB 978-3-9814 108-6-0

<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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 545.980,00 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.

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

Im Berichtszeitraum führten die Partner vom 10. bis 17. März den 10. Projekt-Workshop in Albuquerque, am 19./20. April den 11. Projekt-Workshop in Braunschweig sowie am 29./30. Mai und am 13. Juni in Clausthal den 12. bzw. 13. Projekt-Workshop durch.

Das vorliegende Teilvorhaben B beteiligt sich mit dem visko-elasto-plastischen Stoffmodell nach Minkley und dem Erweiterten Dehnungs-Verfestigungsansatz nach Günther/Salzer an den geplanten Arbeiten. Dabei wird das Programm FLAC3D (Fa. Itasca) verwendet.

Außerdem realisiert das IfG die Planung und Durchführung der Laborversuche zur Ableitung der Kriechparameter bei kleinen Deviatorspannungen (AP1), wozu u. a. die Entwicklung und der Bau von drei neuartigen Versuchsständen für Kriechversuche mit einer verbesserten Messgenauigkeit sowie einer erschütterungsarmen, speziellen Klimakammer erfolgte.

Das IfG hat im Berichtszeitraum den 10., 11., 12. und 13. Projekt-Workshop gemeinsam mit den Partnern vorbereitet und durchgeführt. Auf den Workshops wurden die Ergebnisse der bisherigen Planungen und Arbeiten sowie der Zusammenarbeit mit Sandia National Laboratories sowie der BGR (zum AP1) vorgestellt und diskutiert.

Auf den vier Projekt-Workshops wurden jeweils die neuesten Ergebnisse eines weiteren orientierenden Kriechversuches auf einem bereits vorhandenen älteren Kriechversuchsstand vorgestellt und mit den Projektpartnern diskutiert. Mit diesem zusätzlichen Versuch wird bei konstanter Deviatorspannung von 4 MPa der Einfluss einer schrittweisen Temperaturabsenkung beginnend mit einer Temperatur von 120 °C untersucht.

Der Bau der 3 neuartigen Kriechversuchsstände mit einer erhöhten Messgenauigkeit von 0,15 nm wurde abgeschlossen und die für die Versuchsdurchführung erforderliche erschütterungsarme Klimakammer fertiggestellt. Seit Ende 2017 werden Testversuche mit Stahl-Dummys durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass zur Konstanthaltung der Einspannung der Prüfkörper mit der erforderlichen Genauigkeit eine verbesserte Regelung erforderlich ist. Die Beschaffung der Einzelkomponenten für diese Regelung wurde in die Wege geleitet.

Gleichzeitig wurde das weitere Versuchsprogramm für die Kriechversuche bei kleinen Deviatorspannungen im Rahmen einer Verlängerung des Projektes WEIMOS mit den Projektpartnern abgestimmt.

An der Ausarbeitung eines gemeinsamen Antrags zur Verlängerung des Projektes WEIMOS hat das IfG mitgearbeitet, wobei zusätzlich zu den Kriechversuchen Versuche zum Einfluss einer Vorschädigung auf die Zugfestigkeit durch das IfG vorgesehen sind.

Das IfG hat sich an der Erarbeitung von mehreren Beiträgen für die IX. Conference on Mechanical Behavior of Salt vom 12. bis 14. September 2018 in Hannover beteiligt, mit denen die bisher in WEIMOS gewonnenen Ergebnisse präsentiert werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im 2. Halbjahr 2018 wird der Bau der verbesserten Druckregelung abgeschlossen und sollen erste Kriechversuche an WIPP-Steinsalzprüfkörpern mit den drei neuartigen Kriechversuchsständen in der erschütterungsarmen Klimakammer begonnen werden.

Weiterhin werden die numerischen Arbeiten zum Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastung, zur Verheilung sowie mit dem virtuellen Demonstrator fortgesetzt.

### 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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 250.023,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Staudtmeister	

## 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 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**

In dem Berichtszeitraum hat der Zuwendungsempfänger mit dem von ihm verwendeten und während der Projektlaufzeit weiterentwickelten Stoffmodell Lubby-CF weitere Berechnungen zu den verschiedenen APs durchgeführt. Für die Berechnungen wurde für Asse Speisesalz und WIPP Salt jeweils ein einheitlicher Parametersatz verwendet, welcher die zur Parameterbestimmung herangezogenen Versuchsdaten bestmöglich wiedergibt. Berücksichtigt wurden hierbei neben den Ergebnissen aus dem im laufendem Projekt durchgeführten Kriech-, Festigkeits- und Verheilungsversuche auch die im Verbundvorhaben Stoffgesetzvergleich III ermittelten Labordaten. Für die Nachberechnung der Verheilungsversuche wurde die stationäre Kriechrate unter Berücksichtigung der aus eben diesen Versuchen ermittelten Dehnungskurven angepasst, welche im Vergleich niedriger liegen als die aus den Kriechversuchen. Ergebnisse aus aktuellen Verheilungsversuchen wurden mit der vorberechneten Volumendehnung und effektiven Dehnung aus der numerischen Analyse mit Lubby-CF gegenübergestellt und den Projektpartnern in den Workshops vorgestellt. Die Gegenüberstellung zeigt hierbei zum Teil eine sehr gute Übereinstimmung mit der Volumendehnungskurve aus den Versuchen. Der Zuwendungsempfänger hat neben weiteren Berechnungen mit der aktuellen Stoffmodellversion zum virtuellen Demonstrator auch Berechnungen zu den IFC und HFCP Versuchen sowie zu Room B durchgeführt, welche im Verbundvorhaben Stoffgesetzvergleich III untersucht wurden. Berechnungsergebnisse wurden den Projektpartnern unter anderem beim in den USA durchgeführten Workshop vorgestellt. Bei diesem Workshop hat der Zuwendungsempfänger auch eine Zusammenfassung zum AP3 - Zugspannungen - präsentiert.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Der Zuwendungsempfänger wird weiterhin an den Workshops teilnehmen. In diesen soll unter anderem gemeinsam mit den Projektpartnern ein weiterer Forschungsbedarf diskutiert werden, die für die Weiterentwicklung der Stoffmodelle zur Beschreibung des Materialverhaltens von Steinsalz von besonderer Bedeutung sind. Des Weiteren sollen weiterführende Berechnungen zum virtuellen Demonstrator durchgeführt werden.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Pockelsstr. 14, 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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 233.387,00 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 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**

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 wurden Workshops in Albuquerque, Braunschweig und Clausthal (2x) durchgeführt.

Im Rahmen des Workshops in Albuquerque wurden die Ziele der einzelnen Arbeitspakete und die aktuellen Entwicklungen hinsichtlich der Berechnung von Verheilungsversuchen und der Modellierung von Zugspannungen in WEIMOS den Partnern von Sandia und Vertretern des Department of Energy vorgestellt.

Bei der Berechnung von Verheilungsversuchen zum Vergleich mit den Daten der aktuellsten Versuche der TUC konnte bisher kein zufriedenstellender Parametersatz gefunden werden, da das tertiäre Kriechen und der dadurch verursachte Kriechbruch weiterhin sehr sensibel kalibriert werden müssen.

Mit dem Modell des Virtuellen Demonstrators der LUH wurden erste Berechnungen durchgeführt, die allerdings ab Einbau des Damms zu numerischen Problemen führen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Parameter des Verheilungsansatzes von TUBSSalt müssen weiterhin mit fortlaufenden Ergebnissen von Verheilungsversuchen angepasst werden. Sofern alleine über die Parameter keine zufriedenstellende Anpassung erreicht werden kann, muss der Ansatz an sich geprüft werden.

Die Arbeiten am Modell des Virtuellen Demonstrators laufen weiter, insbesondere die Suche nach der Ursache für die numerischen Probleme.

Für die kommende Tagung SaltMech IX werden die angenommenen Beiträge in Form von Vortrag und Poster vorbereitet.

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

Bericht zum Stoffmodell TUBSSalt und zum vorlaufenden Verbundprojekt:

Gährken, A. (2018): Untersuchungen zum Einfluss der Spannungsgeometrie auf das Verformungs- und Schädigungsverhalten von Steinsalz. Dissertation. TU Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Braunschweig

<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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 406.332,00 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**

Im Berichtszeitraum führten die Projektpartner am 12./13. März in Albuquerque (New Mexico, USA), am 19./20. April in Braunschweig sowie am 29./30. Mai und 13. Juni in Clausthal-Zellerfeld die Projekt-Workshops 10 bis 13 durch. Auf dem Workshop beim assoziierten Projektpartner Sandia National Laboratories in Albuquerque stellten die Partner die Arbeiten in der bisherigen Projektlaufzeit für alle Arbeitspakete vor. Der Zuwendungsempfänger präsentierte in dem Zusammenhang den erreichten Stand zum Themenkomplex Schädigungsrückbildung mit den begleitenden Laborversuchen (AP2). Zusätzlich diskutierten alle Projektpartner aktuelle Themen wie Schädigungsrückbildung, Verformungsverhalten infolge von Zugbelastungen sowie die Ergebnisse zum Virtuellen Demonstrator. Neben neuen Berechnungsergebnissen zum Virtuellen Demonstrator mit geändertem Berechnungsmodell, stellte der Zuwendungsempfänger eine thermo-mechanische Simulation mit besonderem Fokus auf die Zugschädigung im Steinsalz infolge einer Erwärmung mit anschließender Abkühlung dar. Grundlage dieser Re-Analyse sind die In-situ-Messdaten der niederländischen Energy Research Foundation (ECN) über eine Bohrlochkonvergenzentwicklung in der Schachanlage Asse II unter Einsatz eines Erhitzers (HFCEP-Experiment) in den 80er Jahren. Dieser Versuche wurde bereits im vorherigen Vorhaben nachgerechnet und die Ergebnisse mit der aktuellen Berechnung unter Verwendung des modifizierten Zugmodellansatzes verglichen.

Ergänzend zu den bereits durchgeführten Verheilungsversuchen der 1. Serie wurden die Ergebnisse einer im Nachgang erfolgten Tauchwägung zur Absicherung der Versuchsanlagennormierung sowie weiterer Verheilungsversuche vorgestellt. Diese waren zum einen die Messergebnisse aus der 2. Serie mit vier Tests an Asse-Steinsalzproben bei einer konstanten Temperatur von 35 °C und einer Versuchsdauer von 120 Tagen, die gekennzeichnet sind durch eine gleichartige Belastung aller Prüfkörper in der Schädigungsphase und unterschiedlichen deviatorischen Beanspruchungen in der Verheilungsphase. Zum anderen wurden die Messdaten eines einzelnen Versuches präsentiert, der unter konstanter Deviatorspannung zunächst geschädigt und bei zwei unterschiedlichen Belastungsniveaus wieder verheilt wurde. Die 3. Versuchsserie der geplanten Verheilungsversuche wurde im Berichtszeitraum gestartet. Diese Versuche werden bei gleichen Belastungsbedingungen geschädigt und die so erzeugte dilatante Verformung anschließend bei unterschiedlichen isotropen Beanspruchungen und einer Temperatur von 35 °C zurückgebildet. Die Workshops 11 bis 13 waren geprägt durch Diskussionen über weiterführende Arbeiten und einer beabsichtigten Projektverlängerung.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Der Zuwendungsempfänger wird Anfang September den 14. Projekt-Workshop in Goslar ausrichten und weitere numerische Simulationen zum Virtuellen Demonstrator (AP5) durchführen. Auf der 9. Konferenz zum mechanischen Verhalten von Steinsalz (SaltMech IX) vom 12. bis 14. September bei der BGR in Hannover wird der Zuwendungsempfänger einen Vortrag über die Inhalte der Arbeitspakete 1 und 2 halten. Die Verheilungsversuche werden gemäß der Planung fortgesetzt.

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

Keine.

<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 11456A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e <sup>2</sup> ), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2016 bis 28.02.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 720.962,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schäfer	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Hauptziel des Vorhabens ist es, die Kenntnisse zur Langzeit-Integrität der Bentonitbarriere im Kontakt mit niedrig mineralisierten Grundwässern (z. B. glazialen Schmelzwässern) und die damit verbundene Bentonit-Erosion und potentielle Mobilisation von Tonminerkolloide/-Nanopartikel aus dem Nahfeldbereich zu untersuchen. Ein weiterer Aspekt ist die Radionuklid-Kolloid und Kolloid-Gesteinsoberflächen-Wechselwirkung und der zugrundeliegenden Mechanismen unter naturnahen Bedingungen am Beispiel geklüfteter Granitsysteme zu erweitern und auf dieser Basis die Relevanz des kolloidgetragenen Radionuklidtransports hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers in einer Hartgesteinsformation zu bewerten. Darüber hinaus werden generische Aussagen zur Kolloidrelevanz erarbeitet. Es schließt damit an die Arbeiten der vorangegangenen KOLLORADO Vorhaben an.

Im Einzelnen soll das experimentelle Programm im Labor und im Untertagelabor Grimsel durch die im KIT-INE angewandten spektro-/mikroskopischen Methoden dazu beitragen, ein verbessertes mechanistisches Verständnis der Integrität der Bentonitbarriere und des kolloidgetragenen Radionuklidtransports zu erreichen. Zudem sollen die Übertragbarkeit der Labordaten auf natürliche Systeme überprüft und Eingangsdaten für die in der Langzeitsicherheitsanalyse verwendeten Codes ermittelt werden. Im Rahmen der Modellierungsarbeiten werden die Codes COFRAME und d<sup>3</sup>f++ für den kolloidgetragenen Schadstofftransport anhand von In-situ-Experimenten am Standort Grimsel weiter qualifiziert und Modelle zu Bentoniterosion weiterentwickelt und angewandt. Im vorliegenden Bericht werden die Arbeiten des KIT beschrieben.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Experimentelles Programm zum kolloidgetragenen RN-Transport (KIT-INE)
  - AP1.1 Mechanismen der Kolloid-RN-Kluftmineral-Wechselwirkung
  - AP1.2. Kolloidgetragene Radionuklid-Migration
- AP2: Modellrechnungen zum kolloidgetragenen RN-Transport (GRS/KIT-INE)
  - AP2.1: Simulationsrechnungen für weitere CFM Homolog/RN Experimente (GRS)
  - AP2.2: Simulationsrechnungen für das integrierte CFM Experiment (GRS/KIT-INE)
  - AP2.3: Bewertung des kolloidgetragenen RN Transports (GRS)
  - AP2.4: Simulation von Strömungs- und Transportvorgängen im Kristallingestein (KIT-INE)
- AP3: Integration der Ergebnisse und Abschlussdokumentation (GRS/KIT-INE)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: *Status:* Der nächste Schritt im Long term In-situ Test (LIT) sieht den Ausbau der Bentonitquelle mitsamt den enthaltenen Radionukliden (RN) sowie der Gelschicht vor. Um die Quelle und die fragile Gelschicht vor der mechanischen Belastung während des Überbohrens zu schützen, wird zuvor ein geeignetes Epoxidharz in die Scherzone injiziert. Der LIT Mock-up Test wurde fortgesetzt, um die Bentonitquelle/Gelschicht in einem geeigneten Verfahren zu konservieren und post-mortem zu untersuchen. Insgesamt stehen vier Erosions-Experimente mit kompaktiertem Bentonitring für eine Machbarkeitsstudie zum Überbohren des LIT-Versuchs zur Verfügung.

Die Messzelle, mit der die Redoxkapazität von kristallinen Wirtsgesteinen (u. a. Äspö-Granit) gemessen werden soll, wurde fertiggestellt. Es kann *in-situ* der zeitliche Verlauf des  $E_h$ -Wertes, der Sauerstoffkonzentration (Nachweisgrenze von 3 ppt) und des pH-Wertes gemessen werden und somit die Redoxkapazität inklusive Kinetik bestimmt werden.

AP1.2: *Status*: Schwerpunkt der Arbeiten im ersten Halbjahr 2018 lag weiterhin auf der begleitenden Analytik (geochemisches und Kolloid-Monitoring und RN-Messungen) und Interpretation der Proben von LIT, der Vorbereitung des Ausbaus des LIT Experiments und der Designstudien zu dem neuen In-situ-Experiment zur Studie des Erosionsverhaltens von Bentonit (MX-80) bei hohem Kompaktierungsgrad (iBET).

- (a) In LIT Proben, die bis zu 887 Tagen nach Beginn des Experimentes gesammelt wurden, konnte  $^{99}\text{Tc}$  mittels AMS im ppq Bereich bestimmt werden.
- (b) Machbarkeitsuntersuchungen zur Stabilisierung der LIT Quellschicht vor dem Überbohren wurden im Labor fortgeführt. In Ergänzung zu den bereits durchgeführten Versuchen an wassergesättigtem, getrocknetem und mit Methanol gewaschenem Kluftfüllmaterial (FFM), wurden Methanol/Wasser Mischungen verwendet. Ziel dieser Experimente war es, die Wasserverträglichkeit der Harze zu testen. Trotz beobachtbarer Heterogenität der Harz-Aushärtung und Wassereinschlüssen war beim Sägen eine feste Verbindung zwischen FFM und Harz beobachtbar. Vergleichende Untersuchungen zur Gelschicht wurden an teilweise und vollständig wassergesättigtem Febex-Bentonit durchgeführt.
- (c) In Rahmen eines Versuchs zum Verhalten von Global Fallout Aktiniden im Bereich der GTS wurden Wasserproben vom Grimsel Stausee sowie Grundwasserproben aus verschiedenen Bohrungen gesammelt. In diesen Proben wurden  $^{236}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  und  $^{239}\text{Pu}$  mittels AMS analysiert und hinsichtlich der Migration von  $^{236}\text{U}$  und  $^{237}\text{Np}$  untersucht. Ausgewählte Proben von In-situ-RN-Remobilisierungstests (REMO-I und REMO-II) wurden für AMS Messungen von  $^{233}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  und  $^{244}\text{Pu}$  vorbereitet und werden in kommenden Strahlzeiten gemessen.

AP2.2: *Status*: Die thermodynamischen Rechnungen wurden mit korrigierten Werten zum Bentonit- Porenwasser (Berücksichtigung der Ladungsneutralität) für die Elemente Se, Tc, Th, U, Np, Pu und Am durchgeführt. Dabei zeigte sich ein Anstieg der Carbonat-Spezies von Th, Np, Am und Pu sowie eine Abnahme der  $\text{Am}^{3+}$ ,  $\text{Pu}^{3+}$  und der  $\text{Th}(\text{OH})_3^+$  Spezies, die auf den leicht erhöhten pH-Wert (7,58 statt 7,44) zurückzuführen sind. Außerdem wurde die  $E_h$  bzw. pH-Abhängigkeiten der Löslichkeitslimitierenden Phasen ermittelt und die Abhängigkeit  $\text{FeSe}(\text{s})$  und  $\text{FeSe}_2(\text{s})$  vom Eisengehalt über einen Konzentrationsbereich von  $10^{-10}$  M bis  $10^{-5}$  M simuliert. Teile dieser Ergebnisse wurden im Rahmen des von GRS/KIT organisierten internationalen „*CFM Workshop on thermodynamic benchmark calculations*“ diskutiert.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1 & 2: Schwerpunkt des nächsten ½ a werden, neben den laufenden Laborversuchen und Modellierungen, die Vorbereitungen zum Ausbau von LIT sein. Die Bentonitquellen der Mock-up Experimente werden in der Werkstatt des Untertagelabors überbohrt. Dabei soll die Stabilität der imprägnierten Gelschicht während der mechanischen Belastung des Überbohrens getestet werden. Die Rahmenbedingungen sollen dabei weitgehend identisch zu dem Ausbau von LIT sein. Die thermodynamischen Simulationsrechnungen sollen auf die Mischwässer ausgeweitet werden. Die Redoxkapazitäten verschiedener Granitproben (FFM, Granitmatrix) soll bestimmt werden. Es ist u. a. geplant, den Sauerstoffverbrauch in Umlaufsäulenversuchen durch Pulsaufgabe  $\text{O}_2$ -angereichertem Wasser in natürlich geklüftetem Granitkernmaterial inklusive Kinetik, zu bestimmen.

AP3: Für KOLLORADO- $e^2$  wird weiterhin auf Publikationen in peer-review Journalen fokussiert (siehe 5.)

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Drake, Mathurin, Zack, Schäfer, Roberts, Whitehouse, Karlsson, Broman, and Åström (2018): Incorporation of Metals into Calcite in a Deep Anoxic Granite Aquifer, *Environ. Sci. Technol.*, 52(2), 493-502

Quinto, Busser, Faestermann, Geckeis, Hain, Koll, Korschinek, Kraft, Ludwig, Plaschke, Schäfer: Ultra-trace determination of  $^{99}\text{Tc}$  in natural water samples with Accelerator Mass Spectrometry. *Anal. Chem.* (in prep.)

Quinto, Geckeis, Hain, Mäder, Plaschke, Schäfer, Steier: Ultra-trace Analysis with AMS of Actinides from Global Fallout and In-situ Tracer Tests. Extended Summary Nr. 25599. Plutonium Futures – The Science 2018

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11456B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- $e^2$ ), Teilprojekt B	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2016 bis 28.02.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 298.115,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Noseck

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Hauptziel des Vorhabens ist es, die Kenntnisse zur Radionuklid-Kolloid und Kolloid-Gesteinsoberflächen Wechselwirkung und der zugrundeliegenden Mechanismen unter naturnahen Bedingungen am Beispiel geklüfteter Granitsysteme zu erweitern und auf dieser Basis die Relevanz des kolloidgetragenen Radionuklidtransports hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers in einer Hartgesteinsformation zu bewerten. Darüber hinaus werden generische Aussagen zur Kolloidrelevanz erarbeitet. Es schließt damit an die Arbeiten der Vorhaben KOLLORADO-1 und KOLLORADO-2 an.

Im Einzelnen soll das experimentelle Programm im Labor und im Untertagelabor Grimsel durch die im KIT-INE angewandten spektroskopischen und mikroskopischen Methoden dazu beitragen, ein verbessertes mechanistisches Verständnis der Integrität der Bentonitbarriere und des kolloidgetragenen Radionuklidtransports zu erreichen. Zudem sollen die Übertragbarkeit der Labordaten auf natürliche Systeme überprüft und Eingangsdaten für die in der Langzeitsicherheitsanalyse verwendeten Codes ermittelt werden. Im Rahmen der Modellierungsarbeiten werden die Codes COFRAME und d<sup>3f++</sup> für den kolloidgetragenen Schadstofftransport anhand von In-situ-Experimenten am Standort Grimsel weiter qualifiziert und Modelle zu Bentoniterosion und Transport weiterentwickelt und angewandt.

Im vorliegenden Bericht werden die Arbeiten der GRS beschrieben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Experimentelles Programm zum kolloidgetragenen RN-Transport (KIT-INE)
  - AP1.1: Mechanismen der Kolloid-RN-Kluftmineral-Wechselwirkung
  - AP1.2: Kolloidgetragene Radionuklid-Migration
- AP2: Modellrechnungen zum kolloidgetragenen RN-Transport (GRS/KIT-INE)
  - AP2.1: Simulationsrechnungen für weitere CFM Homolog/RN Experimente (GRS)
  - AP2.2: Simulationsrechnungen für das integrierte CFM Experiment (GRS/KIT-INE)
  - AP2.3: Bewertung des kolloidgetragenen RN Transports (GRS)
  - AP2.4: Simulation von Strömungs- und Transportvorgängen im Kristallingestein (KIT-INE)
- AP3: Integration der Ergebnisse und Abschlussdokumentation (GRS/KIT-INE)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Durchführung und Dokumentation aller Rechnungen zu thermodynamischen Benchmarks zur Speziation der in den CFM-Feldexperimenten verwendeten Radionuklide. Zusammenstellung und erste Auswertung der Ergebnisse aller Teilnehmer aus UK, Südkorea, Japan, Deutschland und Tschechien.  
 Organisation und Durchführung eines Workshops zur Präsentation und Diskussion der Ergebnisse des Benchmarks bei GRS in Berlin. Identifikation offener Fragestellungen zu den Benchmark-Rechnungen und Festlegung der weiteren Vorgehensweise. Erstellung eines Fragebogens zur Klärung der offenen Punkte und Versendung an die Teilnehmer des Benchmarks.  
 Entwicklung eines konzeptuellen Modells zur Simulation der geochemischen und Transport-Prozesse im Nahbereich des LIT-Experiments mit dem Rechenprogramm PHAST und Durchführung erster Testrechnungen.
- AP3: Ausrichtung des CFM-Modeller Workshops in Berlin zur Diskussion der Ergebnisse mit den anderen Modellierergruppen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Durchführung weiterer spezifischer Rechnungen zum thermodynamischen Benchmark und Beantwortung des Fragebogens. Auswertung des Fragebogens aller und der Rechenergebnisse weiterer Teilnehmer, die nicht auf dem Workshop vertreten waren. Abschließende Auswertung des thermodynamischen Benchmarks zusammen mit dem Projektpartner KIT-INE. Vorbereitung der Veröffentlichung (s. AP3).  
 Simulation der geochemischen und Transport-Prozesse im Nahbereich des LIT-Experiments mit dem Rechenprogramm PHAST. Vergleich der Ergebnisse mit experimentellen Daten und Identifikation der relevanten Prozesse und Effekte.  
 Weiterführung der Simulationsrechnungen zu den Durchbruchkurven für U und Np in CFM RUN 13-05 und CRR #32 unter Berücksichtigung der Redoxkinetik.
- AP3: Erstellung einer Publikation auf Basis der Ergebnisse der Benchmark-Rechnungen und des CFM-Modeller Workshops in Berlin in einer Fachzeitschrift.  
 Durchführung eines Arbeitstreffens mit dem Verbundpartner KIT-INE, Diskussion der Ergebnisse und Planung des Abschlussberichts.

### 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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.447.555,00 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

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in sechs Arbeitspakete:

AP1: Anforderungsanalyse und Wissensmanagement

AP2: Vorarbeiten für die Codeentwicklung

AP3: Codeentwicklung. Umsetzung der in AP2 erarbeiteten Konzepte in einen Programmcode

AP4: Test, Qualitätssicherung, Dokumentation

AP5: Verfolgung von Anforderungen aus aktuell laufenden FuE-Projekten

AP6: Berichte zum Projektfortschritt

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Zur Erweiterung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet von Strömungs- und Transportprozessen in porösen Medien wurde an folgenden internationalen Konferenzen teilgenommen:

- InterPore 2018 vom 14.05. bis 17.05. in New Orleans (USA). Auf der Konferenz wurde ein Vortrag über die Konzepte zur einfachen Integration von Effekten in den



Basisprozess gehalten, die im neuen RepoTREND-Nahfeldmodul NaTREND umgesetzt werden sollen und ein Poster zu diesem Thema präsentiert (s. Abschnitt 5).

- CMWR 2018 (Computational Methods in Water Resources 2018) vom 03.05. bis 07.05. in Saint-Malo (Frankreich).
- AP2: Das Modell für Gebirgskonvergenz, das ursprünglich für einphasigen Transport in gesättigten porösen Medien entwickelt wurde, wurde zum Teil für zweiphasigen Transport in ungesättigten Medien angepasst (z. B. Abhängigkeit des Gasvolumens und -drucks von der Temperatur).
- AP3: Die Umsetzung von bereits existierenden Konzepten wurde fortgesetzt. Der Schwerpunkt lag bei der Realisierung der auf das Rechengitter bezogenen Daten als standardisierte globale Datenfelder mit dem Registry-Konzept. Beim Registry-Konzept werden alle Datenfelder bei einem speziellen Objekt registriert, das die Datenfelder über den vollen Lebenszyklus kontrolliert. Dies ermöglicht eine effiziente, standardisierte Erzeugung, Modifizierung und Ausgabe entsprechender Daten.  
Im Rahmen der Codepflege bereits vorhandener und eingesetzter Teile des Pakets RepoTREND wurden einige Korrekturen und Erweiterungen am Statistik-Modul RepoSTAR, insbesondere bezüglich grafischer Sensitivitätsanalyse, vorgenommen. Diese waren und sind weiterhin erforderlich, um künftig aussagekräftige probabilistische Rechnungen mit dem neuen Nahfeldmodul zu ermöglichen.
- AP4: Die entwickelten Konzepte, zugrundeliegenden Entscheidungen sowie der Projektfortschritt wurden dokumentiert.
- AP5: Anforderungen im Kontext des Projekts CHRISTA II (FKZ 02E11617B) wurden diskutiert und aufgenommen.
- AP6: Der vorliegende Bericht wurde erstellt.

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

Schwerpunkt im nächsten Halbjahr ist das AP2. Einige Aspekte des Modells zur Gebirgskonvergenz müssen noch diskutiert und überarbeitet werden. Weiterhin sollen für das Nahfeldmodul NaTREND relevante vorhandene Modelle und Konzepte identifiziert und evaluiert sowie eigene Konzepte erstellt werden.

Die Arbeiten zur Bereitstellung eines Rechengittergenerators werden fortgeführt.

Die Arbeiten zur Anbindung des Codes SobolHDMR werden fortgeführt.

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

Tatiana Reiche: Design Pattern Enabling the Flexible Integration of Effects into a Basis Flow Model, 14.-17. Mai, 2018, New Orleans (USA)

(<https://events.interpore.org/event/2/contributions/397/>)

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11476A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A	
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.3	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.06.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.023.480,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Schneider

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Mit d<sup>3</sup>f und r<sup>3</sup>t wurden Werkzeuge zur Modellierung der dichteabhängigen Grundwasserströmung und des Radionuklidtransportes durch poröse Medien (Vorhaben GRUPRO bzw. TRAPRO) mit expliziter Berücksichtigung von Wärmetransport, Klüften und Kluftsystemen sowie freier Grundwasserflächen (E-DuR) entwickelt. Durch die Umstellung auf die neue, C++-basierte Plattform UG4 erfuhren die Codes eine deutliche Beschleunigung und wurden zu einem einheitlichen Werkzeug „d<sup>3</sup>f++“ integriert (A-DuR, H-DuR). Der Code d<sup>3</sup>f++ wurde bzw. wird in den Vorhaben WEIMAR, QUADER und SANTOS angewendet.

Das Vorhaben hat eine Anwendung des Grundwasserströmungs- und Transportcodes d<sup>3</sup>f++ auf endlagerrelevante Aufgabenstellungen, Vergleichsrechnungen mit anderen Codes und damit einen Nachweis seiner Leistungsfähigkeit sowie die Erhöhung des Vertrauens in die Modellierungsergebnisse zum Ziel. Dazu gehören eine Weiterentwicklung der Lösungsverfahren insbesondere für regionale Modelle mit freier Grundwasserfläche, eine weitere Beschleunigung und eine breitere Anwendbarkeit. Letzteres soll neben Verbesserungen in Benutzeroberfläche und Präprozessor durch die Einführung eines Speicherterms geschehen, dessen Implementierung in d<sup>3</sup>f++ eine genauere Modellierung kurzfristiger Prozesse ermöglicht.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

- AP1: Anwendungs- und Vergleichsrechnungen
- AP2: Erweiterung des Anwendungsbereichs d<sup>3</sup>f++
- AP4: Projektleitung und Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### AP1.1: Äspö Task 9:

Ein Screening aller Präsentationen zu Task 9 wurde mit dem Ziel durchgeführt, die in der Grundwasser Task Force verfolgten Lösungsansätze zu kategorisieren, um daraus Schlussfolgerungen für die Wahl eines eigenen Modells zu ziehen. Dabei wur-

den drei im Grundsatz unterschiedliche Ansätze identifiziert. Hervorzuheben sind dabei die extrem hochauflösenden Modelle, die das Gestein in seiner Kornstruktur beschreiben und dabei die Mineralzusammensetzung samt ihren unterschiedlichen Sorptionseigenschaften einbeziehen.

Der Entwurf für den Bericht von Fracture Systems Ltd und GRS über den Skin-Workshop im Mai 2016 in Prag wurde auf dem Meeting der Grundwasser Task Force vorgestellt. Ein letztes Review für den Bericht stand noch aus, alle erforderlichen Zustimmungen lagen vor.

AP1.2: Site Descriptive Model (SDM) für Äspö

Die orientierenden Modellrechnungen an einem regionalen vertikalen 2D-Schnitt wurden fortgesetzt. Dabei wurde anhand von Rechnungen mit einer freien Oberfläche die Plausibilität des sich ergebenden Grundwasserspiegels überprüft und bestätigt.

AP1.3: Modell der WIPP Site

Die Arbeiten an den Modellrechnungen mit freier Grundwasseroberfläche wurden weitergeführt.

AP1.4: Strömung und Transport im Kristallin für einen potentiellen Endlagerstandort in Tschechien.

Der Aufbau des Regionalmodells, in enger Anlehnung an die hydrogeologische Struktur des Modells von SURAO, wurde fortgesetzt.

AP2.1: Eine Implementierung des Speicherterms in d<sup>3f++</sup> liegt inzwischen vor. Sie wurde anhand eines ersten Beispiels getestet.

AP4: Am 26.06.2018 fand beim G-CSC in Frankfurt das vierte Projekt-Statusgespräch statt. Dabei stellten die GRS-Mitarbeiter den Stand Anwendungsrechnungen und die G-CSC-Mitarbeiter die bis dahin erfolgten Entwicklungsarbeiten vor, die zeitliche Planung der weiteren Arbeiten wurde aktualisiert.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1.1: Task 9: Erarbeitung von Prinzipmodellen zur Erklärung der gemessenen Tracerprofile. Veröffentlichung des „Skin-Reports“ als GRS-504.

AP1.2: Abschluss der Arbeiten am 2D-Vertikalmodell. Erstellung des 3D-Modells.

AP1.3: WIPP-Site: Die Rechnungen werden fortgeführt.

AP1.4: Das Regionalmodell wird fertiggestellt.

AP2.1: Testrechnungen mit dem Speicherterm werden durchgeführt.

AP4: Das nächste Projektstatusgespräch soll im November 2018 stattfinden.

#### 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 11476B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2016 bis 30.06.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 595.088,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Wittum	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziele des Projekts sind eine Anwendung des Grundwasserströmungs- und Transportcodes  $d^3f++$  auf endlagerrelevante Aufgabenstellungen, Vergleichsrechnungen mit anderen Codes und damit einen Nachweis seiner Leistungsfähigkeit sowie die Erhöhung des Vertrauens in die Modellierungsergebnisse. Dazu gehört eine Weiterentwicklung von  $d^3f++$  hinsichtlich einer verbesserten Robustheit der Lösungsverfahren insbesondere für regionale Modelle mit dünnen Schichten und freier Grundwasser Oberfläche, einer weiteren Beschleunigung der Rechnungen und einer breiteren Anwendbarkeit. Letzteres soll neben Verbesserungen in der Benutzeroberfläche und der Modellerstellung durch die Einführung eines Speicherterms geschehen, der eine genauere Modellierung kurzfristiger Prozesse ermöglicht. Hierzu sollen im Projekt Anwendungs- und Vergleichsrechnungen: 1.1 Äspö Task 9, 1.2 „Äspö site descriptive model“, 1.3 Modell der WIPP-Site (AP1), die Erweiterung des Anwendungsbereichs von  $d^3f++$ : 2.1 Erweiterung der Strömungsgleichung in  $d^3f++$  um einen Speicherterm, 2.2 Weiterentwicklung des Präprozessors ProMesh (AP2) und die Weiterentwicklung der Lösungsverfahren: 3.1 Übertragung und Implementierung des LIMEX-Verfahrens, 3.2 Robuste Glättungsverfahren für den geometrischen Mehrgitterlöser, 3.3 Verbesserung der Grobgitterkorrektur, 3.4 Anpassung der FAMG-Verfahren an die thermohaline Grundwasserströmung und parallele Skalierbarkeit, 3.5 Parallele adaptive Verfahren und angepasste Gitterstrukturen, 3.6 Stabile Modellierung freier Grundwasser Oberflächen (AP3) eingebracht werden.

Die Ergebnisse werden zusammen mit den Projektpartnern verwertet. Das Simulationssystem UG ist weltweit über 390-mal lizenziert. Diese Nutzergemeinde ist eine ausgezeichnete Plattform zur Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse. Es erfolgt eine Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig. Das Verbundprojekt ist ein Folgevorhaben der drei BMBF-Projekte vom 01.10.2006-31.03.2011 (FKZ 02E10326), vom 01.10.2008-30.09.2012 (FKZ 02E10568) und vom 01.03.2012-31.10.2015 (FKZ 02E11062).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Bei der Durchführung des Verbundvorhabens werden folgende Arbeitspakete vom Lehrstuhl Simulation und Modellierung der Universität Frankfurt bearbeitet:

- AP1: Anwendungs- und Vergleichsrechnungen
- AP2: Erweiterung des Anwendungsbereichs von  $d^3f++$
- AP3: Weiterentwicklung der Lösungsverfahren in  $d^3f++$

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### AP1: Anwendungs- und Vergleichsrechnungen

Da bei Simulationen der freien Oberflächen im WIPP-Modell numerische Artefakte, wie unphysikalische Verformungen usw. auftreten, wurde die Kopplung der Strömungs- und Transportgleichungen mit dem Tracking der freien Oberfläche weiter untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Probleme am Interface aus der Anwendung der bilinearen Ansatzfunktionen in Gitterelementen (Prismen) resultieren. Die Schwierigkeiten werden von der Auswertung des Gradienten des Drucks für die Darcy-Geschwindigkeit in geschnittenen Elementen verursacht. Obwohl diese Probleme bei der Anwendung der Tetraedergitter nicht entstehen, ist die Verwendung der Prismen für die Auflösung der schmalen geologischen Schichten ein wesentlicher Punkt: Auf Tetraedergittern ergeben die linearen Löser für solche Geometrien schlechte Konvergenzraten, und die Lösungen können andere numerische Artefakte enthalten. Daher wurde die Kopplung des Strömungsmodells mit der Bewegung der freien Oberfläche in Gitterelementen mit bilinearen Ansatzfunktionen genauer untersucht.

#### AP2: Erweiterung des Anwendungsbereichs von $d^3f_{++}$

Die Erweiterung des Speicherterms in den Gleichungen für  $d^3f_{++}$  wurde erfolgreich durchgeführt. Damit ist es nun möglich, eine druckabhängige Porosität des durchströmten Mediums zu berücksichtigen. Implementiert wurden bisher eine lineare und eine exponentielle Abhängigkeit der Porosität vom Druck. Weitere Gesetzmäßigkeiten lassen sich leicht ergänzen. Die notwendigen Parameter lassen sich entweder direkt angeben oder aus dem spezifischen Speicherkoeffizienten für das poröse Medium berechnen. Zur Qualifizierung des neuen Codes wurden zwei Testfälle gerechnet. Der eine simuliert die Entspannung von Grundwasser über ein Bohrloch, der zweite den Einfluss einer variablen Porosität auf das Elder-Problem. Die erhaltenen Simulationsergebnisse entsprechen in beiden Fällen den Erwartungen.

In der Gittergenerierungssoftware ProMesh wurde ein neues Visualisierungswerkzeug implementiert, das die Skalierung des Blickfeldes und damit der dargestellten Geometrien entlang unterschiedlicher Achsen ermöglicht. Dieses Werkzeug ist enorm hilfreich um hochgradig anisotrope Geometrien mit dünnen Schichten, wie sie in den betrachteten Problemstellungen häufig auftreten, entlang einer Achse visuell zu überhöhen und effizient bearbeiten zu können. Da die Koordinaten der zugrundeliegenden Geometrie nur im Zuge der Visualisierung temporär angepasst werden, können alle geometriebezogenen Algorithmen weiterhin auf den originalen Koordinaten arbeiten. Dies ist insbesondere auch dann wichtig, wenn externe Daten wie Rasterdaten mit Höhen- oder Schichtinformationen zusammen mit den Geometriedaten bearbeitet werden müssen.

#### AP3: Weiterentwicklung der Lösungsverfahren in $d^3f_{++}$

Das LIMEX-Verfahren zur Zeitintegration hat sich als fester Bestandteil von  $d^3f_{++}$  etabliert. Es steht nun neben der klassischen Zeitintegration über Runge-Kutta-Verfahren als fester Bestandteil des Programmpaketes zur Verfügung und kann über die lua-Skripten ebenso komfortabel eingebunden werden wie die übrigen Integrationsverfahren. Experimente wurden insbesondere für den Saltpool-Benchmark erstellt. Dieser Test stellt insofern eine Herausforderung dar, als dass die gemessenen Konzentrationen sehr gering sind und daher eine große Genauigkeit der Simulation erforderlich ist. Durch eine entsprechend klein gewählte Toleranz war es möglich, solche Simulationen erfolgreich durchzuführen. Die für die Problemstellung wichtige Dispersion stellte kein Problem dar und konnte mit der bekannten Ausdünnung der Jacobi-Matrix behandelt werden. In weiteren massiv-parallelen Tests für den Gorleben-2D-Testfall wurde eine Abhängigkeit des Zeitschrittes von der Gitterweite beobachtet. Ein solches Verhalten trat in allen vorherigen Tests jedoch nicht auf. Dieser Zusammenhang muss also weiter untersucht werden. An dieser Stelle bietet sich eine Verknüpfung mit der Ortsadaptivität an.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden entsprechend der im Antrag angegebenen Vorgehensweise fortgesetzt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

S. Reiter, A. Vogel, G. Wittum: Large Scale Simulations of Continuum Models using Parallel Geometric Multigrid Methods; In: K. Binder et al. (eds.), NIC Symposium 2018, NIC Series (accepted)

<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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 325.199,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Wolf	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Wesentlichen 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

- AP2: Es wurden keine Arbeiten zu AP2 im ersten Halbjahr 2018 durchgeführt.
- AP3: Die im Jahr 2017 fertiggestellte FEP-Liste für die Betriebsphase (umfasst mehr als 140 FEP) wird auf Basis der Konzepte aus den Vorhaben KONEKD und KOSINA für Endlager in Kristallingestein bzw. flachgelagerte Salzgesteine erweitert.
- AP4: Es wurden keine Arbeiten zu AP4 im ersten Halbjahr 2018 durchgeführt.
- AP5: Ergänzung des FEP-Katalogs für die Nachverschlussphase entsprechend den Ergebnissen von KONEKD und KOSINA.
- AP7: Bereits fertige Ergebnisse wurden in den Abschlussbericht integriert. Ergebnisse aus BASEL wurden am 20.3.2018 auf der Waste Management 2018 in Phoenix in der Session Operational Safety and Post-Closure Safety präsentiert (siehe 5.). Es erfolgte ein Erfahrungsaustausch zur Betriebssicherheit mit US-Kollegen im Rahmen eines Besuches der WIPP in Carlsbad, New Mexico.

Die Arbeiten in AP6 (Synthese) wurden noch nicht begonnen.  
Die Arbeiten zu AP1 sind abgeschlossen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Arbeiten sind abgeschlossen und dokumentiert. Es wird über die GRS (Köln) ein weiterer Austausch mit dem Vorhaben GEOSAF geben. Zudem soll geprüft werden, in wieweit die in dem internationalen Vorhaben GEOSAF-II abgeleitete Methodik des „Safety Envelopes“ auf die Bewertung der Abhängigkeiten zwischen Betriebsphase und Nachverschlussphase in Deutschland übertragbar ist
- AP2: Das Sicherheits- und Nachweiskonzept wird detaillierter ausgeführt.
- AP3 + 4: Ableitung der Einwirkungen von innen (EVI) für die Komponenten „Grubenbaue und Richtstrecken“ sowie „Einlagerungsbereiche“ und Vervollständigung der Ableitung der EVI für die Komponente „Schacht“ für die FEP aus den Konzepten aus den Vorhaben KONEKD und KOSINA.
- AP6: Die Arbeiten in diesem AP (Synthese aus den AP2 bis AP5, Vorschläge zum methodischen Vorgehen) beginnen in der zweiten Hälfte des Jahres 2018.
- AP7: Erstellung des Abschlussberichtes. Vorstellung der Ergebnisse auf dem Safety Case Symposium der OECD/NEA vom 10. bis 12. Oktober in Rotterdam.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Wolf, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Fahrenholz, C., Filbert, W., Lommerzheim, A., Noseck, U., Prignitz, S.: Investigation of their Interactions by a FEP Analysis – WM 2018 paper #18040.

<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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 319.655,82 EUR	<b>Projektleiter:</b> Filbert	

## 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
- 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

BGE TECHNOLOGY GmbH ist federführend für die Arbeitspakete 2, 3 und 5.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3: Die im Jahr 2017 fertiggestellte FEP-Liste für die Betriebsphase (umfasst mehr als 140 FEP) wurde auf Basis der Konzepte aus den Vorhaben KONEKD und KOSINA für Endlager in Kristallingestein bzw. flachlagernden Salzformationen erweitert.
- AP5: Der FEP-Katalog für die Nachverschlussphase wurde diskutiert und überarbeitet. Die Bewertung der Nachverschlussphase hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den sicheren Betrieb eines Endlagers wurde fortgeführt. Es erfolgten Ergänzungen auf der Basis der Ergebnisse der Projekte KONEKD und KOSINA.
- AP7: Bereits fertige Ergebnisse wurden in den Abschlussbericht integriert. Ergebnisse aus BASEL wurden am 20.3.2018 auf der Waste Management 2018 in Phoenix in der Session Operational Safety and Post-Closure Safety präsentiert (siehe 5.).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Es wird geprüft, inwieweit die in dem internationalen GEOSAF-II abgeleitete Methodik des "Safety Envelopes" auf die Bewertung der Abhängigkeiten zwischen Betriebsphase und Nachverschlussphase in Deutschland übertragbar ist. Die Arbeiten zum AP 1.3 berücksichtigen zusätzlich eine Beschreibung der Endlagerkonzepte für Kristallingestein (Projekt KONEKD) und flachlagernde Salzformationen (Projekt KOSINA):
- AP2: Das Sicherheits- und Nachweiskonzept wird detaillierter ausgeführt.
- AP3 + 4: (Bau und Betriebsphase): Ableitung der Einwirkungen von innen (EVI) für die Komponenten „Grubenbaue und Richtstrecken“ sowie „Einlagerungsbereiche“ und Vervollständigung der Ableitung der EVI für die Komponente „Schacht“ für die FEP aus den Konzepten aus den Vorhaben KONEKD und KOSINA.
- AP5: Es erfolgt eine Ergänzung
- des FEP-Kataloges für die Nachverschlussphase entsprechend den Ergebnissen der Projekte KONEKD und KOSINA sowie eine
  - Ableitung der Einwirkungen von innen (EVI) für die Komponenten "Grubenbaue und Richtstrecken" sowie "Einlagerungsbereiche" und Vervollständigung der Ableitung EVI für die Komponente Schacht, da neue FEP hinzugekommen sind.
- AP6: Die Arbeiten in diesem AP (Synthese aus den AP2 bis AP5, Vorschläge zum methodischen Vorgehen) beginnen in der zweiten Hälfte des Jahres 2018.
- AP7: Die Berichtserstellung zum Gesamtvorhaben BASEL wird fortgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Wolf, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Fahrenholz, C., Filbert, W., Lommerzheim, A., Noseck, U., Prignitz, S.: Operational Safety and Post-Closure Safety: Investigation of their Interactions by a FEP Analysis – WM 2018 paper #18040.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11496A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2016 bis 30.04.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 786.134,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Muñoz	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel dieses Vorhabens ist das wesentlich verbesserte Verständnis der metallischen Korrosion der Abfallbehälter in salzhaltigen, geochemischen Milieus und der Rückhaltung von Actiniden durch die Korrosionsprodukte unter den im Nahfeld eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Ton- und im Salzgestein herrschenden Temperatur- und Druckbedingungen. Die Anwendung elektrochemischer Hochdruck/Hochtemperatur-Messmethoden mit samt moderner Spektroskopie- und Mikroskopie-Techniken soll dem Abbau von Ungewissheiten und Konservativitäten bei der Erstellung einer Langzeitprognose für die Freisetzung von Actiniden nach einem Ausfall von Endlagerbehältern dienen. Dieses Vorhaben leistet damit einen Beitrag zur sicherheitsanalytischen Bewertung des Langzeitverhaltens von Ton- und Salzformationen als Endlagerwirtsgesteine.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Einzelnen werden folgende Teilziele verfolgt:

AP1: Aufbau einer elektrochemischen Messzelle zur Untersuchung der Korrosionskinetik

AP2: Elektrochemische Untersuchungen

AP3: Chemische und morphologische Charakterisierung

AP4: Koordination des Verbundvorhabens

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Elektrochemische Untersuchungen (AP2)

Die Korrosionsuntersuchungen von Edelstahl AISI 309S in NaCl-gesättigten Lösung (Q3) wurden fortgesetzt. Weitere Polarisationsversuche zur statistischen Bestimmung der Temperaturabhängigkeit des Aufbruchpotentials und des Repassivierungspotentials im Bereich von 25 °C bis 90 °C wurden systematisch durchgeführt. Zudem wurde der Passiv-Aktiv-Übergang mittels elektrochemischer Impedanz untersucht. Der Einfluss des Druckes auf den Passivitätsaufbruch wurde ebenfalls mittels Polarisationsversuche und Elektrochemische Impedanz er-

forscht. Elektrochemische Untersuchungen wurden auch in  $\text{MgCl}_2$ -gesättigten Lösungen durchgeführt.

Im Gegensatz zu den Experimenten in Q3-Lösungen zeigt das Edelstahl in Q2-Lösungen keinen Passiv-Aktiv-Übergang, sondern ein frei korrodierendes System. Die Temperatur verschiebt lediglich das Korrosionspotential zu negativeren Werten aufgrund einer Erhöhung der Metallauf Lösungsgeschwindigkeit. Elektrochemische Versuche zeigen, dass der Abstand zwischen Aufbruchs- und Repassivationspotential von Edelstahl in Q3-Lösung mit der Temperatur abfällt. Ab 90 °C verschwindet aber die Passivität fast vollständig und das Metall erreicht einen aktiven Auflösungszustand. Kein Passivbereich wird in Q2-Lösung beobachtet. XPS-Analysen deuten auf die Anwesenheit von Sulfat an der in Q3-Lösung korrodierten Oberfläche hin. Daher scheinen die in der Q3-Lösung enthaltene Sulfate einen inhibitorischen Effekt zu leisten.

#### Chemische und morphologische Charakterisierung (AP3)

Die Morphologie und die chemische Zusammensetzung der Oberfläche von Stahlproben wurden nach den elektrochemischen Experimenten mittels REM-EDX und XPS untersucht. Die Analysen wurden am KIT durchgeführt und zusammen ausgewertet. Die Auswertung der REM-EDX Analysen zeigen, dass die lokalisierte Korrosion von Edelstahl in Q3 beginnt mit einem kristallographischen Angriff, der durch die Bildung von Salzfilmen zu einer flachen Korrosion umwandelt. Die Metallauf Lösung hinterlässt Cr-Fe-Carbidpartikel, die als kathodische Zentren agieren können. Die Korrosion von Edelstahl in Q2-Lösung zeigt einen flächen deckenden Verlust der Passivität. Die Metallauf Lösung wird durch eine Oberflächentextur, aufgrund der kinetisch kontrollierten Metallauf Lösung, gekennzeichnet. Die in den elektrochemischen Experimenten beobachtete Erweiterung der Passivität lässt sich mit einer Änderung des Verhältnisses  $\text{Mo(VI)/Mo(III)}$  im Oxid verbinden.

#### Koordination des Verbundvorhabens (AP4)

Projektmeeting zur Diskussion der Ergebnisse am 8. August 2018 bei der GRS in Planung. Diskussion u. a. zur Beteiligung der Verbundpartner am MaCoTe Experiment.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Bestimmung der zeitlichen Änderung des Korrosionspotentials und der Korrosionsgeschwindigkeit von Edelstahl AISI 309S in Q2-Lösung bei 90 °C mittels Polarisations- und Elektrochemische-Impedanz-Versuche unter 5 und 50 bar.
- Metallographische Untersuchung von Edelstahl AISI 309S durch Ätzbilder zur Aufklärung des Einflusses der metallographischen Struktur auf den Zusammenbruch der Passivität.
- Systematische Untersuchung des Einflusses des Druckes auf die Zusammensetzung der Passivschicht mit Schwerpunkt in der Konzentration und Wertigkeit von Mo.
- Systematische Untersuchung der inhibitorischen Effekte von Sulfat auf die von Chlorid verursachte lokalisierte Korrosion.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Corrosion of Steel in High-level Radioactive Waste Rock Repositories: Kinetics and Thermodynamics. A.G. Muñoz, D. Schild, NACE 2018, April 2018, Phoenix, Arizona

<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 11496B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2016 bis 30.04.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 475.748,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Finck	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die chemische und mechanische Stabilität von Metallbehältern mit radioaktiven Abfällen stellt im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse einen wichtigen Aspekt dar. Für eine robuste Modellierung der Behälterkorrosion unter endlagerrelevanten Bedingungen ist ein detailliertes Verständnis der Teilprozesse des korrodierenden Materials erforderlich. Information zur Metallkorrosion für Bedingungen eines Endlagers in Steinsalz stehen nur sehr begrenzt aus der Literatur zur Verfügung. Ziel des Vorhabens ist es das Verständnis der Metallkorrosion der Abfallbehälter im salzhaltigen Milieu unter den im Nahfeld eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle herrschende T- und P- Bedingungen wesentlich zu verbessern. Mit Hilfe elektrochemischer Methoden sollen Teilreaktionen erschlossen werden, und mit Hilfe spektroskopischer und mikroskopischer Methoden die Struktur und die Zusammensetzung der Korrosionsprodukte sowie deren Oberflächen-Morphologie charakterisiert werden. Ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens ist es die Rückhaltung von Radionukliden an synthetischen, gut charakterisierten Referenz- Eisenkorrosionsprodukte mittels spektroskopischer und chemischer Methoden zu untersuchen. Ziel dieser Arbeiten ist es Unsicherheiten bezüglich der Wechselwirkung dieser Sekundärphasen mit Radionukliden und der langfristigen Prognostizierbarkeit der Auswirkungen auf die Radionuklidmobilität abzubauen. Eine Zusammenarbeit läuft mit der GRS Braunschweig.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP0: Literaturstudie
- AP1: Elektrochemische Untersuchungen
- AP2 Identifizierung von Eisenkorrosionsphasen und Sorption von Actiniden
  - AP2.2: Langzeitkorrosionsexperimente und Sorption von Actiniden
  - AP2.3: Quantenchemischen Rechnungen
- AP3: Dokumentation und Publikation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2:

Die Experimente zur Korrosion der Werkstoffe (CrNi-Stahl und C-Stahl) unter anaeroben Bedingungen bei 90 °C in salinaren Lösungen für unterschiedliche Kontaktzeiten wurden fortgesetzt. Eine Wiederholung der Experimente mit einer Kontaktzeit von 3 Monaten mit beiden Werkstoffen jeweils in gesättigter NaCl oder MgCl<sub>2</sub> Lösung bestätigten die Anfälligkeit zur Lochfraßkorrosion des CrNi-Stahls und zur gleichmäßigen Korrosion des C-Stahls. Bei 90 °C wurden ebenso Experimente mit einer Kontaktzeit von 6 Monaten mit beiden Werkstoffen jeweils in gesättigter NaCl- oder MgCl<sub>2</sub>-Lösung und zusätzlicher Zugabe von CaCl<sub>2</sub> und MgSO<sub>4</sub> durchgeführt. Nach der verlängerten Reaktionszeit zeigt der CrNi-Stahl erste Anzeichen von Lochfraßkorrosion unter Bildung von Grünem Rost. Die gleichzeitige Anwesenheit von CaCl<sub>2</sub> und MgSO<sub>4</sub> zeigt im Fall vom C-Stahl keinen Unterschied auf die Art der Korrosionsprodukte oder die Korrosionsrate im Vergleich zu den NaCl- oder MgCl<sub>2</sub>-Experimenten. Reduzierenden Bedingungen haben sich in alle diesen Experimenten entwickelt (Abnahme des Eh um ca. 100 mV). Bei Experimenten mit beiden Werkstoffen in gesättigter NaCl- oder MgCl<sub>2</sub>-Lösung bei Raumtemperatur mit einer Kontaktzeit von 6 Monaten konnte keine Korrosion mittels XRD oder Raman Spektroskopie nachgewiesen werden. Mittels REM-Untersuchungen wurden auf dem C-Stahl Spuren von Grünem Rost-Sulfat und NaSO<sub>4</sub> in der Nähe der Probenaufhängung gefunden und es fand eine schwache Lochfraßkorrosion am Rand der Probe statt. Dagegen konnte auf dem CrNi-Stahl keine Fe-Sekundärphasen detektiert werden.

Für die Untersuchungen zur Actinidenrückhaltung wurde Am(III) an Magnetit adsorbiert und Röntgenabsorptionsmessungen durchgeführt. Diese Ergebnisse zeigen keinen Effekt der Ionenstärke und sind im Einklang mit den Ergebnissen der Modellierung von der Eurückhaltung bei vergleichbaren Konzentrationen.

Mit Hilfe quantenchemischer Rechnungen (DFT) haben wir den Einbau von U(V) in Magnetit untersucht und dabei sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment erreicht, was wiederum zur Identifikation der Einbaustellen geführt hat.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP2:

Neue Korrosionsversuche bei 90 °C mit einer Kontaktzeit von 6 und 9 Monaten mit beiden Werkstoffen jeweils in gesättigter NaCl oder MgCl<sub>2</sub> Lösung sollen gestartet werden. Ebenso sollen Experimente mit beiden Werkstoffen jeweils in gesättigter NaCl oder MgCl<sub>2</sub> Lösung bei Raumtemperatur und eine Kontaktzeit von 9 Monaten gestartet werden. Die neuen Experimente werden in einer Ar-Box angesetzt, um jegliche (selbst geringe) Sauerstoff-Kontamination in den Reaktoren ausschließen zu können.

Experimente zu Rückhaltung von Eu an Magnetit in MgCl<sub>2</sub> Lösung sollen durchgeführt werden. Vorversuche zur Rückhaltung von Eu an Grünem Rost und Hibbingit sind ebenso in Planung.

Mit Hilfe quantenchemischer Rechnungen wird die Struktur von Grünem Rost GR(CO<sub>3</sub>) bestimmt.

Über den Effekt der Ionenstärke auf die Rückhaltung von Am/Eu an Magnetit wird ein Manuskript vorbereitet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Abstract zur Goldschmidt-Konferenz 2018

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11526A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern (CREATIEF), 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> 01.12.2016 bis 28.02.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 28.02.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 58.938,34 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kudla	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben CREATIEF soll die Chancen und Risiken der Option Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe in Tiefen Bohrlöchern (3000 m bis 5000 m) in technischer und sicherheitstechnischer Hinsicht vertieft untersuchen. Dabei sollen insbesondere die bisher getroffenen Annahmen und Randbedingungen in aktuellen Studien und Forschungsvorhaben im Ausland und Inland analysiert und bewertet werden. Mögliche Defizite sollen identifiziert werden. Dabei soll vor allem untersucht werden, in wieweit die aktuellen Studien im Sinne einer soliden technisch-wissenschaftlichen Prüfung zur Bewertung der technischen und insbesondere sicherheitstechnischen Machbarkeit belastbar sind. Für identifizierte mögliche Schwachstellen bei den Annahmen und Randbedingungen sowie im technischen Konzept sollen - soweit möglich - Verbesserungen und Lösungsansätze entwickelt werden. Dazu soll eine SWOT-Analyse angefertigt werden.

Das Vorhaben CREATIEF hat Bezug zum FuE-Bereich 3: Endlagerkonzepte und Endlagertechnik und zum FuE-Bereich 4: Sicherheitsnachweis.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Analyse der in der nationalen und internationalen Literatur getroffenen Annahmen und Randbedingungen
- AP2: Analyse und Bewertung der Eckpunkte bei der "Tiefen Bohrlochlagerung"
- AP3: Gesamtbewertung von Chancen und Risiken
- AP4: Dokumentation und Abschlussbericht

Die TU Bergakademie Freiberg ist federführend für AP1. Bei AP2 bis AP4 ist BGE TECHNOLOGY federführend.

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

- AP1: Abschluss der Analyse der in der nationalen und internationalen Literatur getroffenen Annahmen und Randbedingungen.  
Bewertungen der Information hinsichtlich der rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland.
- AP2: Bearbeitung eines Eckpunktes des Arbeitsprogrammes: Havariebewältigung.
- AP3: Keine.
- AP4: Abschlussbericht liegt als Entwurf vor.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP1: Keine.
- AP2: Keine.
- AP3: Keine.
- AP4: Endfassung des Abschlussberichtes.

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

Vortrag beim 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle am 20./21. Juni 2018 in Karlsruhe: „Ergebnisse des Forschungsprojektes CREATIEF – Chancen und Risiken der Endlagerung von hochradioaktiven Abfallstoffen in sehr tiefen Bohrlöchern“

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11526B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern (CREATIEF), Teilprojekt B		
<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> 01.12.2016 bis 28.02.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 28.02.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 115.084,31 EUR	<b>Projektleiter:</b> Bollingerfehr	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben CREATIEF soll die Chancen und Risiken der Option Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe in Tiefen Bohrlöchern (3000 m bis 5000 m) in technischer und sicherheitstechnischer Hinsicht vertieft untersuchen. Dabei sollen insbesondere die bisher getroffenen Annahmen und Randbedingungen in aktuellen Studien und Forschungsvorhaben im Ausland und Inland analysiert und bewertet werden. Mögliche Defizite sollen identifiziert werden. Dabei soll vor allem untersucht werden, in wieweit die aktuellen Studien im Sinne einer soliden technisch-wissenschaftlichen Prüfung zur Bewertung der technischen und insbesondere sicherheitstechnischen Machbarkeit belastbar sind. Für identifizierte mögliche Schwachstellen bei den Annahmen und Randbedingungen sowie im technischen Konzept sollen - soweit möglich - Verbesserungen und Lösungsansätze entwickelt werden. Dazu soll eine SWOT-Analyse angefertigt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Analyse der in der nationalen und internationalen Literatur getroffenen Annahmen und Randbedingungen
- AP2: Analyse und Bewertung der Eckpunkte der Option "Tiefe Bohrlochlagerung"
- AP3: Gesamtbewertung von Chancen und Risiken
- AP4: Dokumentation und Abschlussbericht

Die TU Bergakademie Freiberg ist federführend für AP1. Die BGE TECHNOLOGY GmbH ist federführend zuständig für AP2, 3 und 4.



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

Im Berichtszeitraum wurden die Untersuchungen im AP2 zu den Themen Sicherheits- und Nachweiskonzept, Dimensionierung Endlagergebäude, Abschätzungen zur Anzahl von Behältern und Bohrlöchern, Einlagerungs- und Rückholtechnik sowie Betriebssicherheit abgeschlossen und die Ergebnisse als Teile des gemeinsamen Abschlussberichtes dokumentiert.

Die Gesamtbewertung der Option Tiefe Bohrlöcher mittels Ausweisung von Chancen und Risiken für alle im AP 2 betrachteten Aspekte wurde im AP3 zusammen mit der TU BAF abschließend durchgeführt.

Die Ergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen wurden im AP4 in einem Abschlussbericht dokumentiert.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine.

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

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11527</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2017 bis 30.11.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 513.184,92 EUR	<b>Projektleiter:</b> Bollingerfehr	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben KoBra hat zum Ziel, unter Berücksichtigung des geltenden gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerkes die Anforderungen an Endlagerbehälter für die Gewährleistung eines sicheren über- und untertägigen Betriebes eines HAW-Endlagers in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein sowie eines sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente herzuleiten, Umsetzungsmöglichkeiten anhand von generischen Behälterkonzepten darzustellen sowie die Auswirkungen entsprechender Designentscheidungen auf die Gestaltung der Endlagersysteme abzuschätzen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Aufarbeitung des nationalen und internationalen Standes zu bereits existierenden Anforderungen und Konzepten für Endlagerbehälter und Zusammenstellung sicherheitsrelevanter Behältereigenschaften
- AP2: Ermittlung der behälterrelevanten Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein in Deutschland
- AP3: Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein
- AP4: Erarbeitung von Vorschlägen für mögliche Behälterkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein
- AP5: Dokumentation und Abschlussbericht

Die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) ist federführend zuständig für AP1 und AP4, die BGE TECHNOLOGY GmbH für AP2 und AP3; AP5 wird gemeinsam von beiden Partnern bearbeitet.

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

Im Berichtszeitraum hat BGE TECHNOLOGY die Arbeiten zum AP2 "Ermittlung der behälterrelevanten Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein in Deutschland" weitergeführt. Der Schwerpunkt lag dabei im Wesentlichen in der Herleitung der Beanspruchungsgrößen für die Behälter in dem ausgewählten Endlagerkonzept im jeweiligen Wirtsgestein. Die Ergebnisse wurden in einem Berichtsentwurf dokumentiert.

Zum AP3 "Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein" wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, systematisch Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager herzuleiten. Mittels eines gewählten Top-Down-Ansatzes wurden dazu zunächst generische (allgemeine bzw. abstrakte) Anforderungen abgeleitet und zusammengestellt. Unter Berücksichtigung der drei betrachteten Wirtsgesteine, der entsprechenden Einlagerungskonzepte und jeweiligen Sicherheits- und Nachweiskonzepte werden anschließend die Anforderungen konkretisiert. Ziel dieser Überlegungen ist es, eine einheitliche Systematik zur Herleitung und Zusammenstellung von Behälteranforderungen für verschiedene Wirtsgesteine und Endlagersysteme zu entwickeln, damit eine Vergleichbarkeit nicht durch die Unterschiedlichkeit der Ableitung der Behälteranforderungen beeinträchtigt wird. Diese Arbeiten wurden planmäßig weitergeführt und Anforderungen für die ausgewählten Einlagerungskonzepte im jeweiligen Wirtsgestein weiter spezifiziert.

Im Rahmen einer Informationsveranstaltung am 28. Mai 2018 bei der BAM in Berlin wurde das Gesamtvorhaben mit einem Übersichts- und mehreren Fachvorträgen der Fachöffentlichkeit vorgestellt. Teilnehmer der Ministerien (BMWi, BMU), des Endlagerbetreibers BGE, der Aufsichtsbehörde BfE, der Zwischenlagerbetreibergesellschaft BGZ, der GNS sowie der GRS unterstrichen die Bedeutung dieses FuE-Vorhabens, das Grundlagen für das begonnene Standortauswahlverfahren für ein HAW-Endlager in Deutschland liefern wird.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im kommenden Berichtszeitraum wird der Arbeitsschwerpunkt für BGE TECHNOLOGY GmbH darin bestehen, die Arbeiten zum AP2 zu vervollständigen, die Ergebnisse mit dem Partner BAM abzustimmen und den Bericht abzuschließen.

Die Arbeiten zum AP3 zur Herleitung der Anforderungen werden nach dem erarbeiteten Top-Down-Ansatz weitergeführt; dabei wird ein entscheidender Schwerpunkt die Quantifizierung der Anforderungen sein. Die Ergebnisse werden mit dem Partner BAM abgestimmt und in einem Bericht dokumentiert.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 12200 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11537</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2017 bis 30.11.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 188.990,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Völzke	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben KoBra hat zum Ziel, unter Berücksichtigung des geltenden gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerkes die Anforderungen an Endlagerbehälter für die Gewährleistung eines sicheren über- und untertägigen Betriebes eines HAW-Endlagers in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein sowie eines sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente herzuleiten, Umsetzungsmöglichkeiten anhand von generischen Behälterkonzepten darzustellen sowie die Auswirkungen entsprechender Designentscheidungen auf die Gestaltung der Endlagersysteme abzuschätzen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Aufarbeitung des nationalen und internationalen Standes zu bereits existierenden Anforderungen und Konzepten für Endlagerbehälter und Zusammenstellung sicherheitsrelevanter Behältereigenschaften
- AP2: Ermittlung der behälterrelevanten Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein in Deutschland
- AP3: Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein
- AP4: Erarbeitung von Vorschlägen für mögliche Behälterkonzepte in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein
- AP5: Dokumentation und Abschlussbericht

Die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) ist federführend zuständig für AP1 und AP4, die BGE TECHNOLOGY GmbH für AP2 und AP3; AP5 wird gemeinsam von beiden Partnern bearbeitet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Nationaler und internationaler Stand zu Behälterkonzepten und -anforderungen  
Die Sortierung, Kategorisierung und Priorisierung der im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche zu weltweiten Endlagerprogrammen zusammengetragenen Dokumentensammlung wurde weitgehend abgeschlossen. Dabei wurden mehr als 6.000 Dokumente erfasst und ausgewertet, von denen etwa 430 unmittelbaren Bezug zu Behälterkonzepten haben. Wesentliche Informationen betreffen Materialauswahl und -verhalten, Fertigung, Korrosion und sicherheitsrelevante Randbedingungen für die einschlussichere Auslegung eines Endlagerbehälters für bestrahlte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle. Die Dokumente wurden in einer systematisch aufgebauten Datenbank gesichert und stehen für weitere Auswertungen zur Verfügung. Die Ergebnisse werden in einem Ergebnisbericht zum AP1 dokumentiert.

AP5: Dokumentation und Abschlussbericht

In regelmäßigen Projektgesprächen mit dem Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY (vormals BGE TECHNOLOGY) wurden der Projektfortschritt vorgestellt und die weiteren Arbeitsschritte diskutiert und vereinbart. Im Rahmen eines Fachinformationsgespräches des Projektträgers Karlsruhe (PTKA-WTE) am 28.05.2018 in Berlin wurden seitens BAM und BGE TECHNOLOGY Projektinhalte und bisherige Ergebnisse zahlreichen anderen Organisationen wie BMU, BMWi, BGE und BfE vorgestellt und Anknüpfungspunkte für einen weiteren fachlichen Austausch geschaffen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Die in verschiedene Kategorien eingeordneten Dokumente der erstellten Literaturdatenbank werden weiter ausgewertet. Ergänzende Literatur wird in das erstellte Kategoriensystem kontinuierlich eingepflegt.

AP3: Auf der Grundlage der in AP1 und AP2 gewonnenen Informationen sollen die Anforderungen an Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle entsprechend den regulatorischen Sicherheitsanforderungen für alle drei potenziellen Wirtsgesteine in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner zusammengestellt werden. Anhand der in AP1 erzielten Ergebnisse werden in diesem AP wirtsgesteinspezifisch Anforderungen hinsichtlich der langfristigen Sicherheit und Schutzzielfunktionen von Endlagerbehältern hergeleitet (AP3.4).

AP5: Der Vorhabenfortschritt wird im Rahmen der regelmäßigen Projektgespräche mit dem Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY sowie auch mit anderen interessierten Parteien dokumentiert. Der Ergebnisbericht zum Arbeitspaket 1 wird fertiggestellt. Zu jedem der Arbeitspakete 2 bis 4 soll ebenfalls ein Ergebnisbericht verfertigt werden sowie ein Abschlussbericht für das Gesamtvorhaben.

### 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 30.04.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 448.984,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Kallenbach-Herbert	

### 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 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 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 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

AP1:

Ein Teilziel des AP1 besteht darin, unterschiedliche Perspektiven zu soziotechnischen Herausforderungen im deutschen Endlagerkontext zu erfassen. Insgesamt wurden arbeitsteilig von Öko-Institut, ITAS und FFU 17 Leitfaden-Interviews durchgeführt und ausgewertet. Im Berichtszeitraum wurden vom Öko-Institut zwei Interviews durchgeführt und diese anhand eines gemeinsam mit Öko-Institut und FFU erarbeiteten Analyserasters ausgewertet.

Im Februar wurde der in AP1 vorgesehene Workshop von allen Projektpartnern gemeinsam durchgeführt, wobei vom Öko-Institut die organisatorische Abwicklung, die Moderation so-

wie eine Präsentation als Diskussionsinput übernommen wurden. Anschließend fand eine gemeinsame Auswertung des Workshops statt. Die Ergebnisse des Workshops, der bereits im letzten Berichtszeitraum abgeschlossenen Literaturanalyse und der Interviewauswertungen werden im AP1-Bericht vorgestellt. Dieser wurde im Berichtszeitraum konzipiert und der Anteil des Öko-Instituts im Entwurf verfasst.

AP3.1 + AP3.2:

Basierend auf den bisherigen Recherchen in AP3.1 wurde die Analyse von Konzepten und Ansätze zur Gestaltung reversibler Entscheidungsprozesse um die Perspektive der Öffentlichkeitsbeteiligung erweitert. Aus der Perspektive der Gestaltung selbstlernender Prozesse ergeben sich Anforderungen an eine geeignete Öffentlichkeitsbeteiligung, aus der Perspektive der Öffentlichkeit ergeben sich Erwartungen an den Prozess und die beteiligten Institutionen. Es wurden Literaturrecherchen aufgenommen, die diese beiden Aspekte und ihre Wechselwirkung anhand der Themencluster „Expertenstreit“ und „Organisationsentwicklung“ reflektieren.

Am 20.06.2018 wurde das Projekt vom Projektpartner ITAS beim 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle mit einem Vortrag zum Gesamtvorhaben vorgestellt.

Es wurden insgesamt vier Projektgespräche der Verbundpartner durchgeführt (zwei Telefonkonferenzen sowie zwei Treffen). Schwerpunkte der Diskussion und Abstimmung waren die oben genannten Themen des AP1.

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

In den nächsten sechs Monaten sind folgende Aktivitäten geplant:

AP1:

Fertigstellung des AP1-Berichts

AP3.1 + 3.2:

Fortsetzung und Vertiefung der Literaturanalyse und systematische Dokumentation der Literatur nach ausgewählten Kriterien

Weitere Feinjustierung des empirischen und analytischen Vorgehens

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

Vortrag bei der 17th Annual STS Conference "Critical Issues in Science, Technology and Society Studies", Akinsara-Minhans, Isidoro Losada, Kallenbach-Herbert, Kuppler: „Sociotechnical challenges in disposal of radioactive waste“, Graz, 7.-8. Mai 2018, Graz

<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 30.04.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 399.013,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Kuppler	

### 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 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

- AP1: Ein Teilziel des AP1 besteht darin, unterschiedliche Perspektiven zu soziotechnischen Herausforderungen im deutschen Endlagerkontext zu erfassen. Insgesamt wurden arbeitsteilig von Öko-Institut, ITAS und FFU 17 Leitfaden-Interviews durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden vom ITAS vier Interviews durchgeführt und diese anhand eines gemeinsam mit Öko-Institut und FFU erarbeiteten Analyse-rasters ausgewertet.  
Im Februar wurde der in AP1 vorgesehene Workshop von allen Projektpartnern gemeinsam durchgeführt, wobei vom ITAS eine Präsentation als Diskussionsinput



übernommen wurde. Daran anschließend fand eine gemeinsame Auswertung des Workshops statt. Die Ergebnisse des Workshops, der bereits im letzten Berichtszeitraum abgeschlossenen Literaturanalyse und der Interviewauswertungen werden im AP1-Bericht vorgestellt. Dieser wurde im Berichtszeitraum konzipiert und der ITAS-Anteil im Entwurf verfasst.

AP4.1: Zur Frage der Erfahrungen mit Long-term Governance in den Themenfeldern Verkehrsüberwachung und Climate Engineering wurde Literatur gesichtet und ausgewählt.

Am 20.06.2018 wurde das Projekt beim 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle mit einem Vortrag zum Gesamtvorhaben vorgestellt (Hocke 2018).

Es wurden insgesamt vier Projektgespräche der Verbundpartner durchgeführt (zwei Telefonkonferenzen sowie zwei Treffen). Schwerpunkte der Diskussion und Abstimmung waren die oben genannten Themen des AP1.

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

In den nächsten sechs Monaten sind folgende Aktivitäten geplant:

AP1: Fertigstellung des AP1-Berichts

AP4: Ausarbeitung der Literaturübersicht zu Langzeit-Monitoring und Governance in ausgewählten Themenfeldern

Weitere Feinjustierung des empirischen und analytischen Vorgehens

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

Vortrag bei der 17th Annual STS Conference "Critical Issues in Science, Technology and Society Studies", Akinsara-Minhans, Isidoro Losada, Kallenbach-Herbert, Kuppler: „Socio-technical challenges in disposal of radioactive waste“, Graz, 7.-8. Mai 2018, Graz

<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 30.04.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<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

AP1: Ein Teilziel des AP1 besteht darin, unterschiedliche Perspektiven zu soziotechnischen Herausforderungen im deutschen Endlagerkontext zu erfassen. Insgesamt wurden arbeitsteilig von Öko-Institut, ITAS und FFU 17 Leitfaden-Interviews durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden vom FFU sechs Interviews durchgeführt und diese anhand eines gemeinsam mit Öko-Institut und ITAS erarbeiteten Analyserasters ausgewertet.

Im Februar wurde der in AP1 vorgesehene Workshop von allen Projektpartnern gemeinsam durchgeführt, wobei vom FFU eine Präsentation als Diskussionsinput übernommen wurde. Daran anschließend fand eine gemeinsame Auswertung des Workshops statt. Die Ergebnisse des Workshops, der bereits im letzten Berichtszeitraum abgeschlossenen Literaturanalyse und der Interviewauswertungen werden im AP1-Bericht vorgestellt. Dieser wurde im Berichtszeitraum konzipiert und der FFU-Anteil (die systematische Auswertung der Interviews) im Entwurf verfasst.

Am 20.06.2018 wurde das Projekt beim 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle mit einem Vortrag zum Gesamtvorhaben vorgestellt. Es wurden insgesamt vier Projektgespräche der Verbundpartner durchgeführt (zwei Telefonkonferenzen

sowie zwei Treffen). Schwerpunkte der Diskussion und Abstimmung waren: die oben genannten Themen des AP1.

- AP1: Teilnahme am Workshop „Geologische Grundlagendaten für die Ausschlusskriterien“, NBG, 18.06.2018; Teilnahme am „Offenen Bürger\*innen-Dialog - Start der Standortauswahl“, NBG, 03.02.2018 sowie regelmäßige Teilnahme an Sitzungen des NBG.  
 Teilnahme an der Tagung: „Atommüll-Lager: Die große Suche ...“, Evangelische Akademie Loccum, 01.-03.06.2018: „Was wir nicht außer Acht lassen sollten“, Vortrag A. Brunnengräber.  
 Teilnahme am Workshop „Eternity Costs and Wicked Legacies: Unacknowledged Constraints to a Sustainability Transformation“, Complexity Science Hub, Wien, 11.-12.06.2018: „Nuclear waste as a wicked problem and its implications for the relation between society, nature and technology“, Vortrag D. Themann.  
 Teilnahme an der „17th Annual STS Conference in Graz“: „Public engagement with new and emerging technologies“, 7./8. Mai 2018: „RWM - a sociotechnical challenge. Insights of the SOTEC-radio Project“, Vortrag A. Akinsara-Minhans (Öko-Institut e.V.), A. M. Isidoro Losada (FFU) und S. Kuppler (ITAS).
- AP2.1: Zur Frage der Erfahrungen und übertragbaren Erkenntnisse (social analogues) bezüglich der soziotechnischen Herausforderungen von anderen Großprojekten (Fracking, Windenergie, CCS) wurde ausgewählte Literatur anhand eines spezifischen Kriterienkatalogs analysiert. Des Weiteren wurde das Konzept der Pfadabhängigkeiten und Pfadentwicklungen analytisch auf das Themenfeld der Endlagerung übertragen.  
 Teilnahme am Workshop „Sustainable Development Goals and Climate Policies in Germany and China“, S 3: „Managing the green transition“, Peking University, 17./18.03.2018: „Path dependence and energy development decisions“, Vortrag A. M. Isidoro Losada.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Verfassen eines Arbeitspapiers „Der socio-technical Divide – Zur unterschiedlichen Interpretation und Nutzung von zentralen Begriffen des Endlagerdiskurses“ (Arbeitstitel).
- AP2.1: Fertigstellung folgender Beiträge “The wicked problem of long term radioactive waste management. Ten characteristics of a complex technical and societal challenge”; “The Multi-Level Problem of Nuclear Waste Disposal. On the investigation of the impact of technological and infrastructure conflicts on the decision-making system of Germany” (gemeinsam mit P. Hocke); “Beyond AkEnd: Between Ambition and Reality” (zur Veröffentlichung in: Brunnengräber/Di Nucci 2018).
- AP2.1: Fertigstellung eines Beitrags über die Erfahrungen und übertragbaren Erkenntnisse (social analogues) bezüglich der soziotechnischen Herausforderungen von anderen Großprojekten (Fracking, Windenergie, CCS).
- AP2.1: Fertigstellung des Beitrags „Pfadabhängigkeiten in der Endlagerpolitik“ (Einreichung in einer politikwissenschaftlichen Zeitschrift).

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Themann, D.; Brunnengräber, A. (2018): The nuclear legacy in the Anthropocene. Interrelations between nature, technology and society, in: Hickmann, T.; Partzsch, L.; Pattberg, P.; Weiland, S. (Ed.) (2018): The Anthropocene Debate and Political Science, Routledge Environmental Research Series (forthcoming)

<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 31.03.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 919.894,00 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: Der Schleuderversatzversuch wurde in der 5. KW nach Reparatur der notwendigen Maschinentechnik planmäßig durchgeführt.  
Die Auswertung der Versuchsdurchführung von Blas- und Schleuderversatz hat gezeigt, dass eine Untersuchung eines statisch-dynamischen Versatzverfahrens sinnvoll ist. Die Planung für dieses Verfahren dazu erfolgt in enger Abstimmung mit den Projektpartnern (GSES, IfG).  
Zur Optimierung des Schleuderversatzverfahrens wurden namhafte Industriepartner einbezogen, welche bei der Beschaffung von geeigneter Technik unterstützen.  
Die Optimierung des Blasversatzverfahrens wird im Labormaßstab weiter durchgeführt.
- AP8: Kontinuierliche messtechnische Überwachung der ersten beiden Versatzkörper erfolgt. Die Polyhalitbildung wurde in situ nachgewiesen. Die gemessene maximale Setzung beträgt je nach Versatzverfahren 0,6 % (Blasversatz) bzw. 1,8 % (Schleuderversatz). Die Setzung war nach 1250 h (Blasversatz) bzw. nach 200 h (Schleuderversatz) abgeschlossen.  
Die Versatzkörper wurden beprobt und hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Versatzmaterials beprobt und im Labor des Instituts für Bergbau und Spezialtiefbau untersucht. Beim Blasversatz sind deutliche Entmischungs- und Entfeuchtungsvorgänge zu beobachten, beim Schleuderversatz keine.
- AP9: Technische Vorbereitungen zur Probenahme wurden in Abstimmung mit GSES und IfG getroffen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP7: Durchführung des statisch-dynamischen Einbringversuchs im September 2018.  
Weiterentwicklung des Laborblasversatzversuchsstands basierend auf den Blasversatz-Versuchserfahrungen. Ausdehnung des untersuchten Verfahrens auf das Anmischen des Versatzmaterials.  
Beschaffung von Maschinentechnik für den optimierten Schleuderversatz und Planung der Versuchsdurchführung.
- AP8: Die Probenahme des IfG beginnt, sobald Versatzkörper 2 die vorgesehene Standzeit von 6 Monaten (Juli 2018) erreicht hat.
- AP9: Nachuntersuchungen des Versatzkörpers beginnen sobald die Probenahme erfolgt ist.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Dipl.-Ing. Stefan Pöttsch; Dipl.-Nat. Melanie Pannach; Dr. rer. nat. Daniela Freyer; Dr. rer. nat. Till Popp; Dr. M. Gruner; Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo: „Entwicklung und In-situ-Erprobung eines langzeitbeständigen, matrixstabilisierten Versatzmaterials auf Steinsalz-Polyhalitbasis“ in „Beiträge zum 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle“. Projektträger Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

<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 31.07.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 517.360,00 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

Zwei von der TUC als Projektkoordinator (mit-)organisierte projektinterne Fachtreffen sind in diesen Berichtszeitraum gefallen, auf welchen nochmals Modifikationen an den Berechnungsvariationen zu den bisher diskutierten Modellen 1.1 und 1.4 gemeinsam von den Projektpartnern beschlossen worden sind. Entsprechend sind organisatorische Tätigkeiten hinsichtlich der Aktualisierung der Datenblätter und der MS-Excel-Tabellenkalkulationsvorlagen nebst Literaturrecherche zu erforderlichen neuen Materialparametern seitens der TUC erfolgt. Ebenso sind von der TUC als einem der Projektpartner die entsprechenden Neu- und Vorausberechnungen zu den hinzugenommenen und modifizierten Variationen mit dem FTK-Simulator durchgeführt und die Ergebnisse zusammen mit denjenigen der anderen Partner einander gegenübergestellt worden. Vorbereitend sind zudem Vorausberechnungen zu Modell 1.5 vorgenommen worden, welches als nächster Benchmark vorgesehen ist. Nach Beschluss auf einem vergangenen Fachtreffen ist eine Publikation („extended abstract“) im Rahmen des bevorstehenden TOUGH-Symposiums federführend von der TUC unter Mithilfe der übrigen Partner ausgearbeitet worden.

Die neuen Simulationen der TUC zu Modell 1.1 haben erneut zu plausiblen Kurvenverläufen für die Auswertungsgrößen geführt. Vergleiche mit den bis dato erhaltenen Simulationsergebnissen der Partner bestätigen dies für die meisten Variationen, jedoch bestehen insbesondere für eine der neu hinzugenommenen Variationen, zu der keine analytische Lösung vorliegt, noch signifikante Unterschiede in den berechneten Kurvenverläufen untereinander. Für die FTK-Simulation eines Materials mit kompressiblem Korngerüst (Biot-Koeffizient  $\alpha < 1$ ) ist die Ursache für die fehlerhaften Ergebnisse identifiziert worden. Auch die Simulationsergebnisse zu den H<sup>2</sup>M-Modellen 1.4 und 1.5 erscheinen plausibel und stimmen dort, wo Vergleichskurven vorliegen (erstes Ergebnis eines Partners, semi-analytische Lösungen), mit diesen überein.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Parallel zu der Sammlung und Gegenüberstellung der noch fehlenden Ergebnisse zu den Modellen 1.1 und 1.4 ist die Simulation von Modell 1.5 durch alle Partner anzugehen sowie die Erarbeitung von Berechnungsvariationen zu weiteren Modellen der Stufe 1 (der Interessenlage der Partner entsprechend) und deren Vorausberechnungen durch die TUC anzugehen. Auch ist die Ausarbeitung erster konkreter Variationen für ein Modell der Stufe 2 geplant.

Neben der für Stufe 2 erforderlichen Weiterentwicklung des FLAC<sup>3D</sup>-TOUGH2-Kopplungs-Simulators ist eine Methode zu finden, die die korrekte FTK-Simulation eines Materials mit kompressiblem Korngerüst ermöglicht. Die an dieser Stelle zueinander inkompatibel erscheinenden Gleichungen der Simulatoren FLAC<sup>3D</sup> und TOUGH2, die für die fehlerhafte Berechnung verantwortlich sind, sind dabei in geeigneter Weise zu erweitern, so dass die entsprechenden Prozesse auf äquivalente Weise in beiden Simulatoren berücksichtigt werden.

Eine erste öffentliche Vorstellung des BenVaSim-Projekts wird auf dem TOUGH-Symposium im Oktober 2018 in Berkeley in Form einer Posterpräsentation erfolgen. Nach dem „extended abstract“ ist dazu das Poster zu erstellen, d. h. von der TUC ist ein Posterentwurf zur Diskussion durch die Partner auszuarbeiten.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11567B</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 B		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2017 bis 30.04.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 529.075,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Czaikowski	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben (BenVaSim) hat zum Ziel qualitätsgesicherte, d. h. in ihrer Funktionalität verifizierter und in ihrer Aussagekraft validierter Simulationswerkzeuge für eine zuverlässige Prognose des Endlagersystemverhaltens insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse im Ton- wie auch im Salinargestein bereitzustellen. Die dabei erzielte Verbesserung der Prognosezuverlässigkeit soll dazu beitragen, das Vertrauen in die Aussagen zum Endlagerverhalten zu stärken.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Organisation und Koordination

AP2: Vorstellung der beteiligten Simulatoren

Dieses Arbeitspaket zielt auf die Zusammenstellung von simulierbaren Prozesse und Phänomene der eingesetzten Simulatoren und der bisher gewonnenen Erfahrungen zum Zweck der Gegenüberstellung von modelltheoretischen Möglichkeiten. Die GRS wird sich hier mit ihren langjährigen Erfahrungen im Umgang mit dem Simulator CODE\_BRIGHT beteiligen.

AP3: Ausarbeitung von generischen Modellen und Festlegung von Parametersätzen

Mit Blick auf die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse zielt dieses Arbeitspaket auf die Ausarbeitung von gemeinsamen Modellen und die Einigung auf gängige physikalische Beziehungen.

AP4: Durchführung und Auswertung von Modellberechnungen

Dieses Arbeitspaket zielt auf die Durchführung von Modellrechnungen mit den in AP3 festgelegten Stoffmodellen und Materialkennwerten.

AP5: Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse

Dieses Arbeitspaket zielt auf die Erarbeitung von für den Ergebnisvergleich heranzuziehenden Auswertungsgrößen, die die räumliche und zeitliche Entwicklung an ausgewählten Modellpositionen darstellen.

AP6: Dokumentation, Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse im internationalen Rahmen

Die eigenen Untersuchungsergebnisse werden in einem GRS Bericht dokumentiert. Die daraus entstandenen neuen Erkenntnisse werden in internationalen Fachzeitschriften mit Peer-review veröffentlicht und auf nationalen und internationalen Fachtagungen vorgestellt.



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

Im Berichtszeitraum haben zwei Projektgespräche stattgefunden: das erste Projektgespräch in Anlehnung an das Mont Terri Technical Meeting am 5./6. Februar 2018 in St. Ursanne sowie ein weiteres Projektgespräch bei der GRS in Braunschweig am 15./16. Mai 2018. Die Projektpartner haben im Berichtszeitraum die inzwischen weitgehend fertiggestellten Arbeiten zu den Modell 1.1 sowie erste Ergebnisse zu Modell 1.4 vorgestellt und diskutiert. Aus Sicht der GRS bestehen weiterhin Schwierigkeiten bei der Umsetzung des vereinfachten Ansatzes einer Aufsättigung des Modells ohne Berücksichtigung gekoppelter Prozesse.

Speziell die Vorgabe einer Teilsättigung im Modell mit Vernachlässigung der Saugspannung bereitet dem von der GRS eingesetzten Simulator CODE\_BRIGTH erhebliche Schwierigkeiten. Die Verwendung einer näherungsweise linearen und sehr flachen Retentionskurve führt im Vergleich mit den Ergebnissen der Projektpartner zu unterschiedlichen Kurvenverläufen. So zeigen die Ergebnisse zu dem Modell 1.1 (wb/wd) deutliche Unterschiede, während die Ergebnisse (zu wa/wc/we) mit den Partnern im Grundsatz übereinstimmen.

Aus Sicht der GRS führt die zunächst vom Konsortialführer gewählte sehr stark abstrahierte Berücksichtigung gekoppelter Prozesse zu Schwierigkeiten bei der Anwendung von CODE\_BRIGTH, so dass hier ein deutlicher Mehraufwand erkennbar ist. Es wird angestrebt parallel zu dem Fortschritt im Projekt der Fragestellung der Abstraktion von gekoppelten Prozessen weiterhin nachzugehen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Ausarbeitung von generischen Modellen und Festlegung von Parametersätzen
- Durchführung und Auswertung von Modellberechnungen
- Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse
- Dokumentation

### **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 31.05.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 793.425 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 Kluft- und Störungszonennetzwerkes präzisiert.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- 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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Ein Teilziel des Arbeitspaketes ist es, den Einfluss geklüfteter Gebirgsbereiche auf die Funktionsweise und Wirksamkeit des Verschlusssystems zu untersuchen. Im Berichtszeitraum wurden TOUGH2-3D-Modellrechnungen auf Basis der abgeschätzten Gasproduktionsraten und einer Wärmeentwicklung durchgeführt und mit Hilfe verschiedener Modellvarianten (mit und ohne Berücksichtigung von Klüften) der Druckaufbau in den Dichtelementen des Verschlusssystems untersucht. Des Weiteren wurde untersucht, wie sich das Sättigungsverhalten der Dichtelemente bei einer Berücksichtigung von Klüften und einer damit verbundenen eventuellen Wassereinströmung verändert.
- AP2: Die standortbezogene Entwicklung von Positionierungskriterien, mit denen geeignete Gebirgsbereiche für die Platzierung von Dichtelementen und Bohrlöchern ausgewiesen werden können, ist ein Schwerpunkt des Arbeitspaketes. Im Berichtszeitraum wurde in einem ersten Schritt dazu das mechanische Kriterium der von Posiva und SKB entwickelten Rock-Suitability-Classification (RSC) auf eine Übertragbarkeit im Rahmen des Projektes SUSE hin untersucht. Das mechanische Kriterium besagt, dass Bohrlöcher, die von Klüften mit einem bestimmten Längenausmaß geschnitten werden, verworfen werden. Mit Hilfe der Software 3DEC wurde eine Programmroutine entwickelt, mit der sich Grubengebäude (Einlagerungsstrecken einschließlich Bohrlöcher) und Kluftsystem darstellen lassen und die entsprechenden Schnittpunkte ausweist.
- AP5: Als Grundlage für großräumige Modellierungen zur Abbildung des Strömungsfeldes und der Radionuklidausbreitung sollen Modellierungen im kleinräumigen Maßstab durchgeführt werden. Ziel der kleinräumigen Modellierungen ist die Nachrechnung von hydraulischen Pumpversuchen, die im Gebiet Yeniseysky durchgeführt wurden und den russischen Kollegen vorliegen. Es handelt sich um Pumpversuche (Benchmark-Versuche) unter instationären Strömungsverhältnissen, die mit Hilfe des Theis-Verfahrens analytisch nachgerechnet werden können. Während erste Nachrechnungen mit TOUGH2 erfolgsversprechend verliefen, gibt es mit der Software 3DEC bei ersten Testläufen zur Parametrisierung weiteren Entwicklungsbedarf. Die Benchmark-Versuche verlangen die Eingabe eines hydraulischen Speicherkoeffizienten, der in 3DEC nicht definiert ist und über die hydraulisch-mechanischen Prozesse indirekt abgebildet werden muss. Entsprechende Lösungsansätze wurden in der Literatur gesichtet und aktuell getestet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Aus den TOUGH2-3D-Modellierungen sollen die auf die Barrieren wirkenden Lastannahmen abgeleitet und im Rahmen der geplanten ingenieurtechnischen Vorbemessung verwendet werden.
- AP2: In einem nächsten Schritt soll das vorliegende russische Grubengebäude in das Programm 3DEC integriert werden. Anschließend soll mit der entwickelten Programmroutine das mechanische RSC-Kriterium (Schnittverhalten von Klüften und Bohrlöchern) ausgewertet werden. Unter Berücksichtigung verschiedener Kluftsystemvariationen soll der Einfluss der Klüftung auf das derzeit entwickelte Endlagerdesign bewertet werden. Darauf aufbauend soll das hydraulische-RSC-Kriterium bewertet werden und Anwendung finden.
- AP4: Weiterführung der Benchmark-Modellierungen mit 3DEC.

### 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 31.05.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 668.900,00 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

Die GRS ist federführend in den AP4 und AP5.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Am 09.04.2018 fand ein Projektgespräch bei der BGE Technology mit Beteiligung der BGR und der GRS in Peine statt. Ein Arbeitstreffen zu den Modellrechnungen (AP5) fand am 26.04.2018 bei der GRS gGmbH in Braunschweig mit Beteiligung der BGE Technology statt.

AP4: Die Sorptionsexperimente wurden weitestgehend vorbereitet. Dies umfasst die Beschaffung der nötigen Gerätschaften (BET-Messgerät, FlowPrep Gerät zur Probenvorbereitung, Krypton und Stickstoff, Flüssigstickstoffbehälter, Titrationselektroden, Zubehör), die Installation im Labor der GRS gGmbH und die Vorbereitung der Geräte auf die Sorptionsexperimente. Das zu untersuchende Probenmaterial wurde der GRS gGmbH von der BGR zur Verfügung gestellt.

AP5: Die Arbeiten an den Grundwasserströmungs- und Transportmodellen wurden weitergeführt. Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Modellierung des großräumigen Matrixmodells, das 2017 von den russischen Kollegen übergeben wurde. Notwendige Erweiterungen und Anpassungen des Codes  $d^3f++$  wurden vorgenommen. Transportrechnungen wurden für ein sorbierendes Radionuklid für zwei verschiedene Permeabilitätsmatrizen durchgeführt.

Daneben wurde zwischen BGE Technology und GRS gGmbH ein Vorgehen zur Erstellung kontinuumsmechanischer Modelle aus stochastischen DFN-Modellen diskutiert. Mit Hilfe von vorab festgelegten Verteilungsfunktionen und den benötigten Parametern zur Lage, Orientierung und Größe der Kluftflächen sowie zur Intensität der Klüftung können generische DFN-Modelle erstellt werden und als Grundlage für Vergleichsrechnungen mit einem Matrixmodell verwendet werden. Neben einem hydraulischen Vergleich zwischen den Ergebnissen eines mit 3DEC berechneten DFN-Strömungsmodells und einem daraus abgeleiteten Matrixmodell wird auch ein Vergleich mit den Ergebnissen aus dem russischen Matrixmodell diskutiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP4: Die Sorptionsexperimente werden begonnen, sobald eine Schulung in der Bedienung des BET-Messgeräts an der GRS gGmbH durch einen Mitarbeiter der Firma micromeritics stattgefunden hat.

AP5: Der Speicherkoeffizient wurde in  $d^3f++$  implementiert. Die in 2017 begonnenen Benchmark-Rechnungen werden weitergeführt. Die Transportrechnungen mit dem russischen Matrixmodell werden abgeschlossen und die Ergebnisse von den verschiedenen Modellierergruppen anhand von Durchbruchkurven verglichen. Im Rahmen eines nächsten Projekttreffens wird die Modellierungsstrategie bezüglich der stochastischen Kluftmodellierung und Strömungs- und Transportmodellierung diskutiert.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11587A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), 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> 01.07.2017 bis 30.06.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 989.049,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Emmerich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Neben dem Wirtsgestein kommt geotechnischen Barrieren wie Schacht- oder Streckenverschlüssen in Endlagern eine besondere Bedeutung zu.

Ein vielversprechendes Konzept ist das von KIT entwickelte Sandwich-System, bei dem das hydraulische Dichtelement aus Wechsellagen aus Bentonit zur Abdichtung und hydraulisch leitenden Potentialausgleichsschichten (Äquipotenzialsegmente – ES) besteht. Experimente im Technikummaßstab zum Nachweis der Funktion sind erfolgreich durchgeführt worden. Der nächste Schritt ist ein großmaßstäbliches Experiment unter Einbeziehung des Wirtsgesteins, bei dem unter Demonstration der Einbautechnik zu prüfen ist, ob die erwarteten Vorzüge des Sandwich-Systems zum Tragen kommen und die Dichtfunktion erreicht wird.

Das Sandwich-Vorprojekt ist ein Verbundprojekt von KIT und GRS mit Beteiligung internationaler Partner BGR, Swisstopo, ENRESA, NAGRA sowie enger Kooperation mit dem ENSI. Das Ziel des Sandwich-Vorprojekts besteht in der Planung eines großmaßstäblichen In-situ-Experiments.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Definition der Erfordernisse an das Verschlussystem
- AP2: Festlegung der Ziele des Experiments
- AP3: Festlegung und Vorbereitung eines Versuchsortes
- AP4: Materialauswahl für Dichtsegmente (DS) und Äquipotenzialsegmente (ES)
- AP5: Auslegungsvarianten von Verschluss und Instrumentierung
- AP6: Auslegungsrechnungen für die Planung von Verschluss und Instrumentierung
- AP7: Festlegung der Bautechniken
- AP8: Festlegung der Instrumentierung
- AP9: Festlegung der Projektorganisation sowie Zeit- und Kostenplanung
- AP10: Berichterstattung
- AP11: Koordination

Die APs werden bis auf nachfolgend genannte APs gemeinsam federführend mit GRS bearbeitet. Das KIT ist federführend bei AP4 und AP11. Die GRS ist federführend für AP3 und AP6.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Berichte zum ESP Experiment (Canada) durch NWMO erhalten und in die Zusammenstellung der Ergebnisse zu internationalen Großversuchen übernommen.
- AP2: Die übergeordneten Ziele des geplanten (In-situ-Experimentes sind unverändert gültig. Sie umfassen den Nachweis der technischen Durchführbarkeit, die Untersuchung des Aufsättigungsprozesses, die Qualifizierung von Mess- und Überwachungstechniken und langfristig den Nachweis der Verschlusswirksamkeit.
- AP4: Mineralogisch/chemische Analyse der Ausbauproben (345 Proben) des HTV-5 wurde begonnen; ebenso Parameterzusammenstellung (hydraulische Steighöhe, Enslin-Neff, Kornverteilung in RRSB Netzen) zur Entwicklung eines Schnelltest zur Abschätzung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der ES Materialien; Fortsetzung MiniSandwich Nr. 7 & 8 mit Bentonit Calcigel mit Modelporenwasser für Opalinuston (Pearson water), Quelldruckentwicklung widerspiegelt die Unterschiede in der Vorsättigung (Einbauwassergehalt), die Einbautrockendichte ( $1,56 \text{ g/m}^3$ ) resultiert in einer deutlich verlängerten Einstellungszeit des hydraulischen Gleichgewichts; aus diesem Grund wurden neue Zellen für Parallelversuche gebaut; Systematische Untersuchung des Quelldruckverhaltens bei unterschiedlicher Trockendichte des Bentonits Ruppach begonnen, Bentonit Ruppach industriemaßstäblich in Kissen kompaktiert und binäres Gemisch für HTV-6 sowie Granulat für 2 neue Minisandwichversuche mit Pearson water hergestellt; Einbau HTV-6 vorbereitet und begonnen
- AP6: Parametrisierung DS und ES aus Materialeigenschaften und Abgleich mit Minisandwichsowie von HTV-Versuchen und Literatur
- AP8: Die Aufsättigung des Sandwichverschlusses wird über TDR TAUPE Kabelsensoren beobachtet. Gerichtete und ungerichtete Drucksensoren im Sandwichverschluss werden zur Quelldruckentwicklung in den DS eingebaut.
- AP11: 2. Projektmeeting (PM) im März 2018 und 3. PM im Juni 2018 zu den geplanten Arbeiten und dem Fortschritt im Projekt; Technisches Meeting zum AP4 im April 2018; NWMO (Canada) und RWM (GB) werden sich ab Juli 2018 am Projekt beteiligen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Abschluss der mineralogisch/chemischen Analyse der Proben des HTV-5; Gegenüberstellung der mineralogisch/chemischen Daten aus dem HTV-4 und dem HTV-5  
Fortgesetzter Test von alternativen ES Materialien in der Harfenapparatur und Etablierung Schnelltest  
Rückbau und mineralogisch/chemische Analyse MiniSandwich-Versuche 7 & 8 (Calcigel/Pearson Water), sofern Gleichgewicht erzielt wurde  
Durchführung HTV-6; Durchführung MiniSandwich-Versuche Bentonit Ruppach/Pearson Water
- AP8: Vervollständigung des Instrumentierungsplans unter Einbeziehung der Verteilung aller Sensoren und der Dimensionierung des Sandwich-Verschlusses im In-situ-Experiment
- AP9: Ausarbeitung Projektplan für In-situ-Experiment (technisch sowie Zeit- und Kostenplan)

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- Emmerich et al. SW-A/B: Preliminary investigations for a Sandwich shaft seal. Mont Terri Technical Meeting TM-35, Porrentruy, February 07-08, 2018
- Emmerich, K. et al. Verbundprojekt: Sandwich-Vorprojekt. 13. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE-Projekten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, Karlsruhe, 20.-21. Juni 2018

<b>Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 E 11587B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), 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> 01.07.2017 bis 30.06.2019	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 710.450,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Wieczorek

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Neben dem Wirtsgestein kommt geotechnischen Barrieren wie Schacht- oder Streckenverschlüssen in Endlagern eine besondere Bedeutung zu.

Ein vielversprechendes Konzept ist das von KIT entwickelte Sandwich-System, bei dem das hydraulische Dichtelement aus Wechsellagen aus Bentonit zur Abdichtung und hydraulisch leitenden Potentialausgleichsschichten (Äquipotenzialsegmente – ES) besteht. Experimente im Technikumsmaßstab zum Nachweis der Funktion sind erfolgreich durchgeführt worden. Der nächste Schritt ist ein großmaßstäbliches Experiment unter Einbeziehung des Wirtsgesteins, bei dem unter Demonstration der Einbautechnik zu prüfen ist, ob die erwarteten Vorzüge des Sandwich-Systems zum Tragen kommen und die Dichtfunktion erreicht wird.

Das Sandwich-Vorprojekt ist ein Verbundprojekt von KIT und GRS mit Beteiligung internationaler Partner BGR, Swisstopo, ENRESA, NAGRA sowie enger Kooperation mit dem ENSI. Das Ziel des Sandwich-Vorprojekts besteht in der Planung eines solchen großmaßstäblichen In-situ-Experiments im Felslabor Mont Terri.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Definition der Erfordernisse an das Verschlussystem
- AP2: Festlegung der Ziele des Experiments
- AP3: Festlegung und Vorbereitung eines Versuchsortes
- AP4: Materialauswahl für Dichtsegmente (DS) und Äquipotenzialsegmente (ES)
- AP5: Auslegungsvarianten von Verschluss und Instrumentierung
- AP6: Auslegungsrechnungen für die Planung von Verschluss und Instrumentierung
- AP7: Festlegung der Bautechniken
- AP8: Festlegung der Instrumentierung
- AP9: Festlegung der Projektorganisation sowie Zeit- und Kostenplanung
- AP10: Berichterstattung
- AP11: Koordination

Die APs werden bis auf nachfolgend genannte APs gemeinsam federführend mit KIT bearbeitet. Das KIT ist federführend bei AP4 und AP11, die GRS bei AP3 und AP6.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Übernahme der Ergebniszusammenstellung zum Verhalten von Bentonit des EU-Projekts BEACON.
- AP2: Die übergeordneten Ziele des geplanten In-situ-Experiments sind unverändert gültig. Sie umfassen den Nachweis der technischen Durchführbarkeit, die Untersuchung des Aufsättigungsprozesses, die Qualifizierung von Mess- und Überwachungstechniken und langfristig den Nachweis der Verschlusswirksamkeit.
- AP3: Der Versuchsort, eine Nische in der Erweiterung des Felslabors, wurde aufgefahren und mit Spritzbeton ausgekleidet. In der Sohle wurden Aussparungen für zwei Versuchsschächte (Hauptschacht und optionaler zweiter Schacht) realisiert. Die Nische wurde am 28.06.2018 in Anwesenheit von Vertretern des BMWi und des Projektträgers offiziell eingeweiht.
- AP5: Für den Hauptschacht wurden ein Durchmesser von 1.2 m und eine Tiefe von 12 m festgelegt. Der Zweitschacht wird eine geringere Tiefe (10 m) haben. Die Auslegung des Zweitschachts wird noch diskutiert. Der Hauptschacht wird ein Verschlussystem mit 5 ES und 4 DS aufnehmen. Die Druckkammer zur Aufsättigung des Verschlusses befindet sich im Bohrloch tiefsten und wird über ein Schrägbohrloch befüllt. Der Injektionsdruck wird ca. 3 MPa betragen. Oberhalb des Verschlusses wird ein Widerlager aus Beton eingebaut.
- AP6: Dreidimensionale hydraulische Auslegungsrechnungen mit homogen-isotropem Gebirge zeigen, dass die Beeinflussung des Porendrucks durch die benachbarte Gallery 08 unproblematisch ist. Unmittelbar vor Abteufen der Schächte wird der Porendruck im interessierenden Bereich unter der Sohle oberhalb 1.5 MPa liegen. Um die Schächte wird sich ein Bereich verringerten Porendrucks ausbilden, der Bereich mit Teilentsättigung und Saugspannung wird sich jedoch nur etwa einen Schachtradius ins Gebirge ausdehnen, bis der Verschluss eingebracht wird.
- AP7: Die Schächte werden bergmännisch oder in Bohrtechnik erstellt, Angebote dazu werden zurzeit eingeholt. Während der Instrumentierung werden Sie aus Arbeitsschutzgründen mit einer Drahtnetzauskleidung versehen, die beim Verschlusseinbau entfernt wird.
- AP8: Die Planung der vorlaufenden Messungen und der Messungen im umgebenden Gebirge ist vollständig. Die Messungen im Versuchsschacht ist noch zu klären, wie Bohrlochwandverformung und axiale Verschiebungen im Verschluss zu messen sind. Außerdem ist zu entscheiden, welche Sensoren an ein kabelloses Datenübertragungssystem gekoppelt werden sollen. Tests zur kabellosen Datenübertragung wurden im Felslabor von IBeWa durchgeführt, eine genauere Auswertung steht noch aus.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Entscheidung zum optionalen Zweitschacht und ggf. Festlegung seiner Auslegung
- Erweiterung des Simulationsmodells um verschiedene geologische Einheiten
- HM-Simulation eines Referenzfalls und von Varianten
- Vervollständigung des Instrumentierungsplans
- Zeit- und Kostenplanung des In-situ-Experiments

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Clausthal, Adolf-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		<b>Förderkennzeichen:</b>  <b>02 E 11597</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase II: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel (STROEFUN-II)		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2017 bis 30.06.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 49.978,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Langefeld	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des bereits erfolgten Forschungsprojektes „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches“ (FKZ: 02E11253) wurde ein Konzept für den gegenständlichen Nachweis der strömungstechnischen Dichtheit von Verschlussbauwerken aus kohäsiven Materialien entwickelt. Dies erfolgte in Kombination mit der Auswahl und rheologischen Charakterisierung von geeigneten Injektionsmaterialien für die Vergütung von getesteten Bauwerksbereichen im Rahmen der gegenständlichen Nachweisführung.

Folgende, noch nicht geklärte Punkte sollen in dieser Projektphase behandelt werden:

- Zeitpunkt der Ausbildung einer Zone erhöhten Permeabilität in Kontaktbereich nach Einbringung des Baustoffes  
Nach Errichtung des Streckenverschlussbauwerkes kommt es zeitabhängig zu einer Schädigung des Kontaktbereiches (KB) Dichtbaustoff/Gebirge und Ausbildung eines Bereichs erhöhter Permeabilität infolge der Schwindprozesse bzw. der Zwangsspannungen aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften der hydraulisch abbindenden Baustoffe. Zur wirksamen Nachvergütung des Kontaktbereiches muss die Injektionsmaßnahme nach der Ausbildung einer Zone erhöhter Permeabilität stattfinden, wodurch dem Zeitpunkt dieser Ausbildung eine entscheidende Bedeutung im Vergütungskonzept zukommt
- Porengrößenverteilung sowie Porositäts-/Permeabilitätsbeziehungen im Kontaktbereich  
Der Zusammenhang zwischen der strömungswirksamen (effektiven) Porosität, der Porengrößenverteilung und der Permeabilität wird als essentielle Grundlage für die Beurteilung der Strömungsbedingungen im Kontaktbereich und die Auswahl des Injektionsmittels im Rahmen des Vergütungskonzepts angesehen.
- zusätzliche, ausgewählte rheologische Eigenschaften der Injektionsmittel  
Im bisherigen Vorhaben wurde die dynamische Viskosität der Injektionsmittel bei einer einzelnen Scherrate gemessen. Eine Beurteilung des Einflusses der Scherspannung und der Zeit sowie Schlussfolgerungen für das resultierende rheologische Verhalten (u. a. struktur-viskoses Verhalten, Thixotropie) und der daraus resultierenden Folgen für das Injektionsverhalten sowie Kenntnisse zu verarbeitungsrelevanten Parametern (u. a. Topfzeit, Trichterauslaufzeit etc.) liegen noch nicht vor.

- Partikelgrößenverteilung in den partikelgestützten Injektionsmitteln

In Phase I wurde die Korngrößenverteilung der partikelgestützten Injektionsmittel im trockenen Zustand betrachtet. In Suspension kann es jedoch durch die Hydratation und Agglomeration zur Bildung von größeren Partikeln kommen, wodurch das Injektionsverhalten der Suspensionen beeinflusst wird. Entsprechende Parameter sind von Bedeutung für die Auswahl des Injektionsmittels und –regimes.

- Einfluss der Anrührtechnik/Upscaling

Der Einfluss der im Labor verwendeten Anrührtechnik (Scherraten, Energieeintrag beim Anrühren) auf die Rheologie und Partikelgrößenverteilung und die Folgen für das Upscaling auf die verwendete Technologie beim Untertage Einsatz.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Vertiefung Kenntnisstand des Kontaktbereiches

AP2: Vertiefung Kenntnisstand der Rheologie und des Qualitätsmanagements von Injektionsmittel und Dichtbaustoff

AP3: Berichtslegung-Dokumentation, Interpretation, Schlussfolgerung

## 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Während des Berichtszeitraums wurde literarisch sowohl der Einfluss der Rheologie auf Dichtbaustoffe, für den Bau eines Dammbauwerkes, als auch auf Injektionsmittel, die entstehende Hohlräume verfüllen sollen, thematisiert. Bei dem Vergleich der Dichtbaustoffe wurde festgestellt, dass die Zusammensetzung der Dichtbauwerke dem Gebirge angepasst werden soll, um einen Ionenaustausch des Verschlussbauwerkes mit zutretender Sole bestmöglich entgegen zu wirken. Auch wurden die Volumenänderungen von Sorelbeton und Salzbeton thematisiert. Je nach Zusammensetzung des Dichtbauwerkes finden unterschiedlich lange Volumenänderungen statt. Prinzipiell kann aber bei einem Sorelbeton von einer Volumenzunahme und bei Salzbeton von einer Volumenabnahme ausgegangen werden. Als langzeitstabiler Baustoff für geotechnische Verschlüsse im Salinar hat sich MgO-Baustoff erwiesen. Die Bildung von Ettringit, welches sich bei dem Zutritt einer magnesiumsulfatfreien Lösung bilden kann, stellt eine weitere Problematik bei Endlagern dar. Folglich sollten Formationen aufgesucht werden, bei denen ein Zutritt magnesiumsulfatfreier Lösungen ausgeschlossen ist.

Auch wurden Injektionsmittel, die bereits erfolgreich in Verschlussbauwerken injiziert wurden, miteinander verglichen. Jedoch sind weitere Versuche mit diesen Injektionsmittel nötig, um das vorläufige Ergebnis zu bestätigen bzw. zu widerlegen. Bei dieser Testung könnten zudem weitere, noch nicht im Salinar verwendete Injektionsmittel, getestet werden.

Allgemeine Grundsätze des Upscalings, wie die Bewahrung von gleichen geometrischen Körperverhältnissen, Einflüsse einzelner Faktoren und Bedeutung dimensionsloser Kennzahlen wurden thematisiert sowie Bereiche definiert, die durch das Upscaling untersucht werden sollen und aus denen Rückschlüsse für die Maßstabsübertragung eines Verschlussbauwerkes gewonnen werden können.

## 4. Geplante Weiterarbeiten

Die erlangten Erkenntnisse sollen in einem Anschlussprojekt angewendet werden.

## 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 30.09.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 656.550,00 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: Zur Durchführung der photometrischen Titration der Selenide wurden zusätzliche Materialien beschafft.  
Bei der isothermen Titrationskalorimetrie wurden verschiedene Arbeitsmodi (Reaktions- und Verdünnungsenthalpie) getestet. Eine standardisierte Vorgehensweise für die Verwendung der isothermen Titrationskalorimetrie wurde erarbeitet und diese anschließend dokumentiert. Weiterhin wurde die Verdünnungsenthalpie von  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  bei  $25\text{ °C}$  mit der Titrationskalorimetrie bestimmt.  
Mit den isopiestic Messungen für ternäre Lösungen von Cäsiumchlorid mit  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  und  $\text{MgCl}_2$  bei Temperaturen  $> 25\text{ °C}$  wurde begonnen.
- AP2: Eine  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  - sowie eine  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  -Stammlösung wurden hergestellt und charakterisiert. Vorversuche für die Experimente zur Rückhaltung von Selenit und Selenat durch Fe-II-Korrosionsphasen wurden angesetzt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Das Messsystem für die photometrische Titration der oxidationsempfindlichen Selenide wird aufgebaut und die Messungen derselben begonnen.  
Für die Messungen mit der isothermen Titrationskalorimetrie wird eine iodfreie  $\text{MgI}_2$ -Stammlösung hergestellt und charakterisiert sowie die bereits hergestellte  $\text{K}_2\text{SO}_3$ -Stammlösung charakterisiert. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Verdünnungsenthalpie von  $\text{MgI}_2$  und  $\text{K}_2\text{SeO}_3$  für  $25\text{ °C}$  und höhere Temperaturen.  
Die isopiestic Messungen für ternäre Lösungen von Cäsiumchlorid mit  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  und  $\text{MgCl}_2$  bei Temperaturen  $> 25\text{ °C}$  werden fortgesetzt. Anschließend Beginn der isopiestic Messungen für das System  $\text{K}_2\text{SeO}_3\text{-H}_2\text{O}$  bei  $25\text{ °C}$  und  $40\text{ °C}$ .
- AP2: Die Batchversuche zur Rückhaltung von Selenit und Selenat durch Fe-II-Korrosionsphasen werden angesetzt sowie die Versuche zur Rückhaltung mit metallischem Eisen vorbereitet.

### 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 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<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 Modellmineraloxiden

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:

- FeS<sub>2</sub> wurde synthetisiert. XRD zeigte, dass eine Mischung aus Pyrit (kubisches FeS<sub>2</sub>) und Marcasit (orthorhombisches FeS<sub>2</sub>) vorliegt.
- Dieses FeS<sub>2</sub> kann bei pH 6.5 innerhalb von 7 Tagen fast 100 % des Tc(VII) aus der Lösung entfernen auf Grund einer Reduktion zu Tc(IV). Dies ist unabhängig von der Tc-Konzentration, auch bei Zugabe von 0.1 M NaCl. Noch zu klären ist, ob Tc(IV) ausfällt oder an der Mineraloberfläche sorbiert.
- Tc-Rückhaltung an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Abwesenheit von Fe<sup>2+</sup> basiert auf Oberflächenkomplexierung, 7 % des Tc(VII) wird im sauren Bereich zurückgehalten. In Anwesenheit von Fe<sup>2+</sup>, Tc wird mit zunehmendem pH-Wert besser zurückgehalten, bei pH > 6.5 ist die Rückhaltung quantitative, mit Reduktion des Tc(VII) zu Tc(IV). Hier hat die Ionenstärke einen geringen Einfluss auf die Rückhaltung. Im Verlauf der Experimente wurde eine festphasen-Bildung beobachtet. Basierend auf Literaturvergleichen wurde dieser Feststoff als Fe<sup>II</sup>-Al<sup>III</sup>-Cl layered double hydroxide (LDH) identifiziert.

AP2:

- Das experimentelle Set-up niedriger Oxidationsstufen von Tc ist fertig gestellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

- Quantifizierung des Ionenstärke-Effekts auf die Rückhaltung von Tc durch FeS<sub>2</sub>.
- Experimentelle und theoretische Identifizierung der Fe(II)- & Fe(III)-Mineralphasen an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Anwesenheit von Fe<sup>2+</sup>.
- Synthese, Charakterisierung und Tc-Rückhaltung an Fe<sup>II</sup>-Al<sup>III</sup>-Cl LDH Phasen.
- Untersuchung der Rückhaltung von Tc an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in Gegenwart von S<sup>2-</sup>.
- XPS, Raman-Mikroskopie, REM & TEM sollen jeweils beitragen, molekulare Mechanismen zu ermitteln, welche die Reduktion von Tc(VII) zu Tc(IV) an Mineralflächen ermöglichen.

AP2:

- Erste spektro-elektrochemische Experimente zur Untersuchung der Reduktion von Tc(VII) zu Tc(IV) in wässriger Lösung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

“Tc immobilization on gamma alumina: a study of the reductant presence and absence”, N. Mayordomo & K. Müller. Oral presentation in RadChem conference, 13th - 18th May, Marienbad (Czech Republic)

“<sup>99</sup>Tc reductive immobilization by Pyrite nanoparticles”, D. M. Rodríguez, N. Mayordomo & K. Müller. Poster presentation in RadChem conference, 13th - 18th May, Marienbad (Czech Republic)

<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 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<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) Start der Tc(IV)-Löslichkeitsexperimente in verdünnten bis konzentrierten NaCl-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Lösungen. Bestimmung von pH-Korrekturfaktoren. (ii) Durchführung der Tc(IV)-Löslichkeitsexperimente in konzentrierten MgCl<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub> und CaCl<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub> Lösungen. (iii) Fertigstellung des Manuskripts "Impact of nitrate on the redox chemistry of Tc". (iv) Es konnte eine geeignete Kandidatin für die in AP1 integrierte Doktorarbeit gefunden werden.
- AP2: (i) Fortführung der Langzeit-Rekristallisationsexperimente. (ii) Modellierung der pH-Abhängigkeit des Entrapment-Effektes und Vergleich mit Literaturdaten.
- AP3: (i) Die in AP3 integrierte Doktorandenstelle konnte zum 1. April 2018 besetzt werden (Tim Platte). (ii) Beginn der Literaturstudie zur Wechselwirkung zwischen Iod und Fe-Sekundärphasen. (iii) Synthese von ersten Grünrostphasen mit verschiedenen Anionen in der Zwischenschicht. Analyse mittels mikroskopischer und spektroskopischer Methoden.
- AP4: (i) Start des Auslaugexperiments mit bestrahltem Kernbrennstoff zur Bestimmung der <sup>129</sup>I Freisetzung (IRF). Erste Probennahmen der Gas- und Lösungsphase. (ii) Entwicklung einer Methode zur Separation von <sup>129</sup>I von anderen Radionukliden in alkalischen Aufschlusslösungen von Kernbrennstoff um dessen Konzentration zu bestimmen.
- AP5 und AP6: Es wurden keine Arbeiten im Berichtszeitraum durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im kommenden Berichtszeitraum sollen von KIT-INE in VESPA II folgende Arbeiten durchgeführt werden.

- AP1: (i) Abschluss der Tc(IV)-Löslichkeitsexperimente in verdünnten bis konzentrierten NaCl-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sowie konzentrierten MgCl<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub> und CaCl<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub> Lösungen. (ii) Beginn der Analysen zur Aufklärung der wässrigen und festen Tc(IV)-Speziation. (iii) Thermodynamische Analyse der Systeme. (iv) Einreichung des Manuskripts zu "Impact of nitrate on the redox chemistry of Tc".
- AP2: (i) Monitoring der Rekristallisationsexperimente. (ii) Vorbereitung/Auswertung von Synchrotronexperimenten.
- AP3: (i) Abschluss der Literaturstudie. (ii) Systematische Optimierung der Synthesen von Fe-Sekundärphasen. (iii) Vorversuche zur Wechselwirkung zwischen Iod und Fe-Sekundärphasen.
- AP4: (i) Weitere Beprobung des Auslaugexperimentes um das Freisetzungsverhalten von <sup>129</sup>I besser zu verstehen. (ii) Weiterentwicklung der Separationsmethode für <sup>129</sup>I.
- AP5 und AP6: Es sind keine Arbeiten im kommenden Berichtszeitraum geplant.

### 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 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b>  01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b>  265.296,00 EUR	<b>Projektleiter:</b>  Dr. Brandt	

## 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 Rückhaltemechanismen 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:  $^{129}\text{I}$ -Iod-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 Rückhaltemechanismen (Anionenaustausch, Einbau durch Ko-precipitation 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

- AP1: Die Literaturstudie zum  $^{129}\text{I}$ -Iod-Inventar und zur Iod-Geochemie in natürlichen Gewässern ist abgeschlossen und liegt in Berichtform vor. Der Informationsaustausch mit KIT-INE zur Iod-Freisetzung wird im späteren Projektverlauf stattfinden, wenn die neuen Daten von KIT-INE vorliegen.
- AP2: In Vorbereitung der Experimente zur Rückhaltung von  $^{129}\text{I}$ iodid (Spurenbereich) durch Anionenaustausch wurde die Syntheseroute der (Mg,Ni)Al-LDH in Bezug auf die Kristallinität optimiert. Erste Anionenaustauschexperimente mit LDH mit unterschiedlichem Ni-Gehalt bestätigen, dass Ni sich positiv auf die Iodid-Rückhaltung auswirkt.
- AP3: Zum Einbau von Iodid durch Kopräzipitation wurden LDH-Proben hergestellt, um den maximalen Iodid-Einbau zu untersuchen.
- AP4: Zur Rückhaltung von Iodid durch kalzinierte LDH-Phasen wurden (Mg,Ni)Al-Cl LDH hergestellt und die Kalzinierungsbedingungen nach Charakterisierung der LDH anhand thermogravimetrischer Untersuchungen festgelegt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im 2. Halbjahr 2018 werden wie geplant weitere Experimente zur Rückhaltung von  $^{129}\text{I}$ iodid durch Anionenaustausch (AP2), den Einbau von Iodid (AP3) und durch kalzinierte LDH-Phasen (AP4) durchgeführt. Zusätzlich werden gemeinsame Infrarot (IR) und EXAFS-Messungen mit KIT-INE geplant und ein entsprechender hausinterner Antrag am KIT-INE gemeinsam mit Dr. Nicolas Finck gestellt, um den Ni-Effekt auf die Iod-Rückhaltung im Detail zu untersuchen.

### 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 (CHRIS-TA 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 31.08.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 698.375,69 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 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**

Das Arbeitspaket 1 befasst sich mit der grundsätzlichen Sicherheits- und Nachweisstrategie. Es wurde ein erster Entwurf für einen Bericht erstellt, der die Sicherheitsstrategie für die drei infrage kommenden Einlagerungsoptionen beschreibt. Darin wurden zum einen die nationalen und internationalen Rahmenbedingungen als grundlegende Elemente dokumentiert und darauf aufbauend wurden die jeweiligen Zielsetzungen und planerischen Festlegungen beschrieben.

Im Arbeitspaket 3 des Projektes geht es um die Entwicklung generischer FEP-Kataloge für ein Endlager in einer Kristallinformation in Deutschland. Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Zusammenarbeit mit Tschechischen Kollegen organisiert. Die dortigen Institutionen SURAO und UJV arbeiten ebenfalls an der Entwicklung eines FEP-Kataloges für Kristallin als Wirtsgestein in Tschechien. Am 30.05.2018 fand zu diesem Thema ein FEP-Workshop in Prag statt. Auf diesem Workshop wurde von beiden Seiten erörtert, in welchen Bereichen eine gemeinsame Arbeit sinnvoll und für beide Seiten effektiv sein kann. Da die Herangehensweise an die Erstellung der FEP-Katalog etwas unterschiedlich ist, wurde vereinbart, einen FEP-Benchmark über das Wirtsgestein und dessen Eigenschaften durchzuführen.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 4 wurde die Arbeiten zur Quantifizierung der in den Sicherheitsanforderungen qualitativ definierten Integritätskriterien fortgeführt. Eine Quantifizierung ist notwendig, um rechnerische Nachweise führen zu können. Dazu wurden zum einen Literaturinformationen gesichtet, die Hinweise auf eine temperaturbedingte Veränderung klüftiger Granitgesteine beschreiben. Zum anderen wurde überlegt, die in den Sicherheitsanforderungen genannten Schädigungskriterien "Dilatanz-Kriterium" und "Fluiddruck-Kriterium" zu einem einzigen "Riss-Kriterium" zusammenzufassen. Der Grund dafür ist, dass kristallines Gestein nicht dilatant reagiert und Festigkeitsüberschreitungen fast ausnahmslos zu Rissbildung führen.

Ebenfalls im Rahmen des Arbeitspaketes 4 wurde eine Modellierungsstrategie erarbeitet, die eine Abbildung der zu simulierenden Prozesse auf drei Detaillierungsgrade aufteilt: ein großräumiges regionales Modell, ein Modell, das kleine Einlagerungsbereiche bzw. ewG abbildet und ein kleinräumiges Modell, das das direkte Nahfeld um die eingelagerten Behälter erfasst. Die Nachweisführung geschieht dann im Zusammenspiel aller drei Modellskalen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Fortführung der Arbeiten zur Quantifizierung der Integritätskriterien
- Konkretisierung des geotechnischen Barrierensystems und Entwicklung zugeordneter Barrierenkonzepte für die drei zu betrachtenden Einlagerungsvarianten
- Entwicklung generischer geologischer Modelle

### **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 (CHRIS-TA 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 30.09.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 352.150,00 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 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

- AP1: Es wurde ein Entwurf eines Berichtes über die Grundzüge eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Kristallingestein erstellt.
- AP3: Es wird zurzeit ein FEP-Katalog für die ewG-Konfiguration „multipler ewG“ erstellt. Am 30.05. fand der zweite FEP-Workshop mit BGE Technology, BGR, UJV (CZ) und SURAO (CZ) in Prag statt. Auf diesem Workshop wurde der Umfang einer Liste der zu betrachtenden FEP im Kristallingestein sowie die Struktur der zu beschreibenden FEP diskutiert.
- AP5: Weiterentwicklung des Konzeptes zur Nachweisführung am Rande des ewG für die ewG-Konfigurationen Typ „überdeckender ewG“ und Typ „multipler ewG“. Am 31.05. fand ein Arbeitstreffen mit UJV (CZ) und SURAO (CZ) in Prag zur Festlegung eines gemeinsamen Rechenfalls zur radiologischen Konsequenzenanalyse statt.
- AP6: Mitarbeit im OECD/NEA Crystalline Club (CRC): Am 05.02.2018 fand ein CRC Bureau Meeting als Videokonferenz statt. Am 13./14.06.2018 fand das 2nd Plenary Meeting des CRC in Mizunami, Japan statt, inklusive einer Topical Session zum Thema „Process Comprehension using Under Ground Research Laboratory“. Ein erster Entwurf des Statusberichts wurde erstellt und auf dem Treffen diskutiert. Das Arbeitsprogramm 2019-2010 wurde ebenfalls diskutiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Weiterentwicklung der Grundlagen eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein. Diskussion des Berichtsentwurfs mit den Verbundpartnern.
- AP3: Fertigstellung des FEP-Kataloges „multipler ewG“, Beginn mit der Erstellung des FEP-Kataloges Typ „überdeckender ewG“.
- AP5: Weiterführung der Arbeiten zur Nachweisführung am Rande des ewG für die ewG-Konfigurationen Typ „überdeckender ewG“ und Typ „multipler ewG“. Berechnung von Sicherheitsindikatoren für beide Konfigurationen. Erstellung eines Rechenfalls zum Benchmark mit UJV und SURAO.
- AP6: Am 19.9. und am 13.12.2018 werden zwei weitere CRC Bureau Meetings stattfinden. Der Statusreport soll fertig gestellt und das Arbeitsprogramm 2019-2010 soll beschlossen werden.

### 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 31.10.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 926.745,00 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 Ausbruchmaterial 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 Endlagerhohlräume
- 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



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Anfang April wurde Ausbruchmaterial aus der Auffahrung einer neuen Strecke durch die sandige Fazies der Opalinus-Tonformation im Untertagelabor Mont-Terri entnommen. Das Material wurde durch die Ermittlung von Korndichte, Wassergehalt und Kornzusammensetzung charakterisiert. Für die Laboruntersuchungen wurden das Rohmaterial mit Grobkörnern bis zu einer maximalen Korngröße von 30 mm und auch das durchgesiebte Material mit Korngrößen kleiner als 10 mm und 5 mm aufbereitet. Neben dem Ausbruchtonstein wurde Bentonit MX80 in Form von Pulver und Pellets besorgt und charakterisiert.
- Zur Dichtebestimmung von kompaktierten Formsteinen als Verschlussbaumaterial wurden das Ausbruchtonstein mit zwei Kornzusammensetzungen von  $d < 30$  mm und  $d < 10$  mm bzw. Gemische aus dem Ausbruchtonstein ( $d < 30$  mm;  $d < 10$  mm) und Bentonit-Pulver ( $d < 2$  mm) in einem Verhältnis von 7:3 in einer großen Oedometerzelle bis zu einer maximalen Belastung von 21 MPa kompaktiert. Hohe Trockendichten wurden erreicht:  $2,2 \text{ g/cm}^3$  für den kompaktierten Ausbruchtonstein und  $2,0 \text{ g/cm}^3$  für das Tonstein/Bentonit-Gemisch. Die kompaktierten Formsteine sind mit den industriell hergestellten Formsteinen aus Tonmaterialien vergleichbar.
- Aufbau und Kalibrieren von Prüfanlagen für die Versuche zur Bestimmung von Quellung, Kompaktion, Wasserpermeabilität und Gastransport des Ausbruchtonsteines und des Tonstein/Bentonit-Gemisches.
- Ein Artikel zum Thema „Sealing Behaviour of Crushed Claystone-Bentonite Mixtures“ wurde erarbeitet und von der Fachzeitschrift „Geomechanics for Energy and the Environment“ zur Veröffentlichung überprüft.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Folgende Versuche werden im nächsten Halbjahr gestartet und durchgeführt:

- Langzeitige Quellungs- und Kompaktionsversuche an vier kompaktierten Tonproben in Oedometerzellen
- Messungen von Quelldruck, Wasserpermeabilität und Gastransport von 10 Tonproben in Oedometerzellen
- Bestimmung der Wasseraufnahme bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten

### 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 31.12.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<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

- AP1: Ziel ist die Entwicklung eines dreidimensionalen, geomechanisch-numerischen Spannungsmodells von Deutschland mit Dimensionen von ca. 1200 x 900 x 80 km<sup>3</sup>. Das Modell wird an tatsächlich gemessenen Spannungsdaten kalibriert
- AP2: Es werden verschiedene Konzepte zur Übertragung mechanischer Gesteinseigenschaften von der Laborskala (cm) auf die Skala typischer Elementgrößen großregionaler geomechanischer Modelle (100er m – km) untersucht

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

Die Einstellung des Projektmitarbeiters, Herrn Steffen Ahlers M.Sc., erfolgte zum 15.05.18. Am 17.05.18 fand in Karlsruhe ein erstes Arbeitstreffen gemeinsam mit den Kooperationspartnern von KIT und GFZ statt, um die Projektplanung auf die zeitlich versetzten Einstellungen der MitarbeiterInnen abzustimmen. Dabei wurden auch bereits geologisch begründete Ränder des Deutschland-Spannungsmodells und die zu modellierenden Einheiten der oberen Lithosphäre diskutiert.

Im an der TU Darmstadt angesiedelten Teilprojekt wurde mit der Erstellung der notwendigen Komponenten der Modellgeometrie begonnen. Dazu zählen vor allem das digitale Höhenmodell und die Zusammenführung von unterschiedlichen Datensätzen, die die Kruste-Mantelgrenze beschreiben. Dies wurde von verschiedenen Tests begleitet, die den Workflow der Modellerstellung verbessern bzw. beschleunigen sollen. Ferner wurde begonnen, eine vereinfachte Modellvariante in 2D zu erstellen, um effektiv die geeignete Ausdehnung und räumliche Begrenzung sowie die zugehörigen Randbedingungen für das spätere 3D Modell abzuleiten.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Folgezeitraum wird hauptsächlich an der Erstellung der 3D Modellgeometrie für das Deutschlandmodell weitergearbeitet. Darüber hinaus werden aus den 2D Modellen geeignete Randbedingungen für die Modellierung des Spannungsfeldes übernommen.

Im August 2018 findet in Darmstadt ein einwöchiger Kompaktkurs statt, bei dem auch die ProjektmitarbeiterInnen aus den Partnerinstitutionen eine vertiefende Einweisung in die geomechanische Modellbildung und deren numerische Analyse mit Finite Element Methoden erhalten. Dies gewährleistet eine rasche Einarbeitung in die verwandte Software HyperMesh und Abaqus und fördert die enge Zusammenarbeit der drei Arbeitsgruppen bei der weiteren Modellerstellung.

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

Das Projekt wird auf der GeoBonn2018, im September mit einem Poster vorgestellt:  
Reiter, K., Henk, A., Heidbach, O., Müller, B., Hergert, T., Schilling, F., 2018: The SpannEnD project – crustal stress data, stress modelling and modelling tools for the site selection process of a deep geological repository of radioactive waste in Germany, GeoBonn 2018, 2.-6. September 2018, Bonn, Germany

<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 31.12.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<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 Untergrundaufbau (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

Aufgrund der Arbeitsmarktsituation für Fachkräfte konnten wir für das Teilprojekt B (AP2) bisher keine Einstellung vornehmen. Erst in der gerade beendeten dritten Ausschreibungsrunde konnten wir eine geeignete Kandidatin identifizieren, die jedoch erst Ende September Ihre Masterarbeit im Fachbereich Geophysik der Universität Potsdam verteidigen kann und somit nicht vor Oktober zur Verfügung steht. Um Verzögerungen im Projekt entgegen zu wirken, haben wir aus GFZ Haushaltsmitteln seit Mai zwei Studierende der Geowissenschaften als wissenschaftliche Hilfskräfte angestellt, um folgende Arbeiten zu beginnen:

#### a.) Geglättetes Spannungsfeld für Deutschland und angrenzende Gebiete

Basierend auf der aktualisierten Datenbank der World Stress Map (Heidbach et al., Tectonophysics, in press) wurde unter Verwendung des neuen Glättungstools stress2grid (Ziegler und Heidbach, 2017) unter Verwendung verschiedener Gewichtungssparameter auf einem regelmäßigen  $0.2^\circ$  Gitter die mittleren Orientierungen der größten horizontalen Spannung SHmax bestimmt. Diese bestimmt in guter Näherung der Orientierung des Spannungstensors in der Erdkruste und ist von grundlegender Bedeutung für die Wahl des Modellrandes für das Deutschlandmodell. Die Wahl des Modellrandes wurde bei zwei internen technischen Treffen diskutiert, da dies die Grundlage für das Strukturmodell ist, welches in AP1 zusammengetragen werden muss.

#### b.) Kompilation von Spannungsmagnitudendaten

Zur langfristigen Vorbereitung der vollautomatisierten Modellkalibrierung, die in AP2 entwickelt wird, muss für die konkrete Anwendung im Projekt SpannEnD eine Datenbank für die Spannungsmagnituden für Deutschland und umliegende Gebiete (Niederlande, Belgien, Frankreich, Schweiz, Österreich, Polen, Dänemark) vorliegen. Im oben genannten World Stress Map Projekt werden allerdings bisher nur SHmax Orientierungen systematisch kompiliert und nach einem Qualitätsschema analysiert. Wir haben daher begonnen eine Vielzahl von Partnern aus den genannten Ländern zu kontaktieren, um die Datenlage festzustellen und die Freigabe der Daten einzuleiten. Die bisherigen Gespräche und Kontakte sind sehr positiv verlaufen und erste Daten sind verfügbar und werden derzeit analysiert. Parallel dazu wird eine professionelle Datenbankstruktur mit der Software postgresSQL entwickelt. Hierzu wird das Projekt von Frau Steffi Lammers der GIS Spezialistin am GFZ in der Sektion 2.6 unterstützt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Für das avisierte vollautomatische Modellkalibrierungstool soll basierend auf ersten Arbeiten von Ziegler et al. (2016) das Tool FAST Calibration v1.0 entwickelt werden. Wir haben diese Arbeiten im Juli begonnen und führen derzeit Tests an generischen Modellen durch. Es ist geplant dieses Tool in einer ersten Version mit einem technischen Manual noch in diesem Jahr zu publizieren, um anderen Arbeitsgruppen dieses zur Verfügung zu stellen. Insbesondere in komplementären Projekten in der Schweiz und in Australien sollen an konkreten Fragestellungen erste praktische Erfahrungen gesammelt werden. Die Entwicklung einer erweiterten Version 2.0 ist für das kommende Jahr 2019 geplant, sobald die Doktorandin die Arbeiten in dem Projekt begonnen hat. In dieser soll die Kalibrierung von Modellen mit nicht-linearitäten durch tektonische Störungen ermöglicht werden. Weiterhin wird die Kompilation der Spannungsmagnitudendaten weiter vorangetrieben, damit zeitnah ein möglichst großer Datensatz für die Modellkalibrierung zur Verfügung steht.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<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 31.12.2020	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<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. Seismizität bedingt kritische Spannungszustände auf Störungen. Informationen zu Spannungsdaten sind nur punktuell vorhanden. Störungsdaten sind zwar in vielen Regionen nur in den Sedimenten erfasst, aber die Datengrundlage für die Störungen ist doch deutlich größer. Ziel ist, in einem geomechanisch-numerischen 3D Spannungsmodell für Deutschland (Dimensionen ca. 1200 x 900 x 80 km<sup>3</sup>) die Spannungen zu modellieren. Dieses Modell wird an punktuell gemessenen Spannungsdaten kalibriert und ermöglicht Prognosen für Bereiche ohne Spannungsdaten und die Ableitung aller sechs Komponenten des Spannungstensors. In weiten Bereichen Deutschlands liegen für die Kalibrierung noch zu wenig Spannungsdaten vor. Daher geht der Modellaufbau einher mit der Gewinnung relevanter Daten (Spannungen, Materialparametern):

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Projektteil AP1.2 erfolgt die Zusammenstellung der Strukturen der Sedimentbecken von Deutschland. Stratigraphisch liegt somit der Fokus auf den post-karbonen Ablagerungsräumen. Für die Zusammenstellung der strukturellen Informationen sollen über die geologischen Landesämter und der BVEG (Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V.) auch soweit wie möglich neue Daten aus der Industrie einbezogen werden. Dies gilt insbesondere für das Norddeutsche Becken, die Molasse und den Rheingraben.

Zusätzlich zu den geologischen Strukturen sollen weitere geomechanisch bedeutsame Parameter wie Porendruck und Spannungsfeld ermittelt werden. Diese können als Randbedingungen oder zur Modellverifikation verwendet werden, um damit u. a. den Parameterbereich für die Berechnungen deutlich zu reduzieren.

Für die jeweiligen Teilbereiche werden die Daten digital erfasst. Die Vernetzung der Strukturen erfolgt in Abstimmung mit dem Grundgebirgsanteil des Modells.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bisher wurden die Vorarbeiten mit Hilfe von studentischen Hilfskräften bzw. Masterarbeiten geleistet. Am 1.9.2018 erfolgt die Einstellung von Frau Luisa Röckel. Auf dem Arbeitstreffen vom 17.05.18 in Karlsruhe wurde die Projektplanung auf die zeitlich versetzten Einstellungen der MitarbeiterInnen abgestimmt. Frau Röckel hat da bereits teilgenommen. Auf dem Arbeitstreffen wurde beschlossen, dass die Projektmitarbeiter, die zum großen Teil Finite Element Modellierungen durchführen, eine Einweisung in die geomechanische Modellbildung und deren numerische Analyse mit Finite Element Methoden erhalten. Der Termin ist vom 20.-24. August 2018.

Im Juni 2018 fand ein Treffen mit Frau Prof. Magdalena-Scheck-Wenderoth (Leiterin der Sektion 6.1 (Beckenmodellierung) am GFZ Potsdam) statt. Dabei wurden auch das Deutschland-Spannungsmodell und die zu modellierenden Einheiten der oberen Lithosphäre diskutiert. Prof. Scheck-Wenderoth hat bereits umfangreiche 3D geologische Struktur- Modelle auch zu Sedimentbecken in Deutschland aufgesetzt. Sie hat sich bereit erklärt, uns mit diesen Modellen als Vorarbeiten zu unterstützen. Von besonderem Interesse ist dabei die Stratigraphie, um für die Modellierungen die entsprechenden Materialparameter zu nutzen.

Die Masterarbeit von Frau Röckel untersuchte das tektonische Spannungsfeld in Süddeutschland in Betrag und Richtung. Daten wurde aus Geothermiebohrungen in Bayern verwendet, der Thermalwasserbohrung Bad Füssing und aus Bohrungen der baden-württembergischen Molasse. Dazu wurden am LGRB in Freiburg die Daten gesichtet und ausgewertet.

Diese neuen Daten ergaben z. B., dass der Gradient der minimalen horizontalen Hauptspannung in der Molasse zwischen 12 und 14 MPa/km beträgt. Für die vertikale Hauptspannung liegt der Gradient zwischen 23.6 und 24.5 MPa/km. Generell nehmen die Gradienten mit der Tiefe deutlich ab.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im Folgezeitraum wird hauptsächlich an der Erstellung der 3D Modellgeometrie für das Deutschlandmodell weitergearbeitet. Darüber hinaus werden aus den 2D Modellen geeignete Randbedingungen für die Modellierung des Spannungsfeldes übernommen.

August 2018 einwöchiger Kompaktkurs: Frau Röckel wird diesen Termin dann bereits wahrnehmen können. Der Kurs gewährleistet nicht nur eine rasche Einarbeitung in die verwandte Software HyperMesh und Abaqus, sondern fördert insbesondere auch die enge Zusammenarbeit der Doktoranden in den drei Institutionen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Das Projekt wird im September auf der GeoBonn2018 mit einem Poster vorgestellt:

Reiter, K., Henk, A., Heidbach, O., Müller, B., Hergert, T., Schilling, F., 2018: The SpannEnD project – crustal stress data, stress modelling and modelling tools for the site selection process of a deep geological repository of radioactive waste in Germany, GeoBonn 2018, 2.-6. September 2018, Bonn, Germany

Die Masterarbeit von Frau Roeckel wurde am 30.7.2018 fertiggestellt - L. Roeckel (2018): Der Spannungszustand in der Molasse als Grundlage zur geomechanischen Bewertung für Geothermieprojekte, KIT, pp101

<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 31.03.2021		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.04.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.110.710,00 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 der Sitzung des RWMC der NEA.
- Teilnahme an den Sitzungen der IGSC Core Group mit Auswertung der Self Evaluation und Planungen zum neuen Programme of Work (PoW) der IGSC.
- Abschließende Arbeiten zum NEA Bericht "Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations: Compiling a Set of Essential Records for a Radioactive Waste Repository" im Rahmen des Vorhabens RK&M.
- Teilnahme an der EBS Task Force in Helsinki. Präsentation der Zwischenergebnisse der Auf-sättigungsrechnungen zu Task 9 – FEBEX-Experiment.
- Teilnahme am Treffen des AK Szenarientwicklung in Braunschweig. Redaktionssitzung zum Positionspapier „Wahrscheinlichkeitsklassen und Umgang mit unwahrscheinlichen Entwicklungen“.
- Beginn des IGSC Internal Peer-Review zum Bericht und der neuen IFEP Liste, Version 3.

#### TA2:

- Benchmark Sensitivitätsanalyse: Auswahl von sechs Modellsystemen (aus Deutschland, USA, Belgien) für die vergleichende Analyse; Auswertung vorhandener Ergebnisse eines amerikanischen Modells für ein Endlager im Schiefer anhand von im Projekt MOSEL identifizierten Methoden.
- Weiterentwicklung des Instrumentariums zur Sensitivitätsanalyse: Testrechnungen mit der Methode SobolHDMR zur Bestimmung von Sensitivitätsindizes zweiter und totaler Ordnung anhand des in MOSEL untersuchten LILW-Modells.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

#### TA1:

- Teilnahme an der kommenden Sitzung des Salt-Clubs und dem Workshop zur US-Deutschen Kooperation in Hannover.
- Teilnahme an dem nächsten IGSC Core-Group Meeting in Paris und Überarbeitung des PoW der IGSC sowie Teilnahme an der jährlichen Sitzung der IGSC, dem EGOS Meeting und dem Safety Case Symposium in Rotterdam.
- Teilnahme an der nächsten Sitzung des AK Szenarientwicklung in Berlin.
- Teilnahme an der nächsten EBS Task Force in Tokio.
- Durchführung des IGSC Internal Peer-Review zum Bericht und der neuen IFEP Liste, Version 3.
- Teilnahme am jährlichen Meeting des IAEA Projekts MODARIA 2.

#### TA2:

- Weitere Tests mit der Methode SobolHDMR; Integration der Methode in das vorhandene Instrumentarium
- Weiterführung der Analyse von Modellsystemen anderer Länder im Rahmen der gemeinsamen Aktivität zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse; Anwendung der in MOSEL identifizierten Methoden auf weitere Modellsysteme aus USA und Belgien; Vergleich der Ergebnisse in internationaler Kooperation.

### 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 6263</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Neu- und Weiterentwicklung von Safeguardstechniken und -methoden		
<b>Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle</b> Bereich 6: Kernmaterialüberwachung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2013 bis 30.06.2018	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2018 bis 30.06.2018	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.077.622,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Niemeyer	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Aufgabe des Vorhabens besteht darin, die Bundesregierung (vertreten durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi) in Fragen der internationalen Kernmaterialüberwachung zu beraten und bei der Weiterentwicklung der Kontrollen zu unterstützen. Im Einzelnen zielte das Vorhaben ab auf Lösungsvorschläge zur weiteren Implementierung des Zusatzprotokolls, Einführung der sog. integrierten Sicherungsmaßnahmen (Integrated Safeguards), Weiterentwicklung des sog. Staatskontrollansatzes (State-level Approach), Entwicklung von anlagen- und brennstoffkreislaufspezifischen Kontrollmethoden sowie Weiterentwicklung von Safeguardstechniken und -methoden unter dem Aspekt der Proliferationsresistenz. Die Arbeiten dienen der Bereitstellung von Arbeitspapieren, Techniken und Veröffentlichungen und der Entwicklung von Auswertemethoden mit dem Ziel der Übernahme der Ergebnisse durch BMWi, Euratom-Kontrollbehörde und Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO).

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Programmpunkte und Arbeitspakete sind:

- Weiterentwicklung von Safeguardstechnologien (Digitale Überwachungssysteme und Datenfernübertragung, analytische Messmethoden, Satellitenfernerkundung und Geoinformationstechnologien)
- Neuentwicklung von Safeguardstechnologien (Technologische Zukunftsforschung, Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung, geophysikalische Messverfahren, Lasertechniken)
- Safeguards-by-Design
- Safeguards für Nuklearanlagen (Entsorgung abgebrannter Brennelemente, Zentrifugenanreicherungsanlagen)
- Weiterentwicklung des staatspezifischen Kontrollansatzes
- Kooperation mit der DGAP zur technisch-politischen Schnittstelle der internationalen Safeguards
- Pflege des nationalen Safeguards-Internet-Portals
- Entwicklung eines Qualitätsmanagements für das EURATOM-Safeguardssystem
- Weiterentwicklung von Safeguards-Überlegungen im Rahmen von „3S“ (Sicherheit, Sicherung, Safeguards)
- Mitarbeit in der European Safeguards R&D Association (ESARDA)
- Weitere Aktivitäten (INMM, SAGSI)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Weiterentwicklung von Safeguardstechnologien:
  - a) Einschluss und Überwachung: Anforderungen bei der Safeguardsüberwachung der Brennelement-Zwischenlager;
  - b) Datenfernübertragung (DFÜ): Unterstützung bei der Durchführung eines DFÜ-Feldtests in zwei Leistungsreaktoren;
  - c) Safeguardsanalytik: Promotionsprojekt zur Synthese von Kalibrierstandards und Referenzmaterialien; Qualifizierung Jülichs für das Netzwerk der IAEO-Analyselaboratorien (NWAL);

- d) Satellitenfernerkundung: Projekt zum Einsatz von Fernerkundung seitens der IAEA;
- e) Geoinformationstechnologien: Entwicklung eines webbasierten Systems zur Übermittlung digitaler Anlagenpläne;
- f) Inspektionsplanung und -bewertung: Projekt zur Verbesserung der Kernmaterialüberwachung unter Einbezug neuer Methoden aus Statistik und Spieltheorie.
- Safeguards für Nuklearanlagen:
  - a) Geologische Endlagerung: Grundlagenermittlung zur Fortschreibung der Safeguardskonzepte und Auswirkungen der Rückholungs- und Bergungsoption auf Safeguardsmaßnahmen in verschiedenen Wirtsgesteinen; Mitarbeit in der Expertengruppe ASTOR; Konzeptstudie 3S (Safety-Security-Safeguards) bezgl. Entsorgung;
  - b) Zusatzprotokoll und Implementierung von Integrated Safeguards (IS): Unterstützung und Beratung von Betreibern, Unterstützung des BMWi bei Anfragen von IAEA und Euratom;
  - c) IAEA-Inspektionsberichte: Erfassung, Aufbereitung und Auswertung; Auskünfte zu Anfragen des BMWi.
- Unterstützung des staatspezifischen Kontrollkonzeptes (SLC):  
Akquisitionspfadanalyse
- Pflege des nationalen Safeguards-Internetportals „safeguards.de“
- ESARDA:  
Präsidenschaft, Leitung Steering Committee, Leitung Executive Board, Leitung Reflection Group, Mitarbeit in vier AGs.
- Weitere Aktivitäten:
  - a) SMÜ/AKÜ-Safeguardskreis und VGB-Arbeitskreis: Mitarbeit;
  - b) INMM: Mitarbeit International Safeguards Division; JNMM Associated Editors;
  - c) SAGSI: Mitarbeit.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Vorhaben wurde zum 30.06.2018 beendet. Derzeit wird der Abschlussbericht erstellt und ein neues Safeguards-Vorhaben vorbereitet.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- Abbas, K. et al.: Educational efforts in Nuclear Safeguards and Non-Proliferation at the European Commission, Joint Research Centre, in collaboration with the European Safeguards Research and Development Association. Proc. Institute of Nuclear Materials Management 59th Annual Meeting, Baltimore, USA, 22-26 Jul 2018
- Moran, B.W. et al.: International Safeguards for Spent Fuel Encapsulation and Geological Repository Facilities. Proc. Institute of Nuclear Materials Management 59th Annual Meeting, Baltimore, USA, 22-26 Jul 2018
- Middendorp, R.: Synthesis and Stability Assessment of Uranium Microparticles: Providing Reference Materials for Nuclear Verification Purposes. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment 424 (RWTH Aachen University, Diss.), 2018
- Middendorp, R. et al.: Uranium oxide microparticle suspensions for the production of reference materials for micro-analytical methods. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. DOI: 10.1007/s10967-018-6076-x
- Neumeier, S. et al.: Microparticle production as reference materials for particle analysis methods in safeguards. MRS Advances 3(19):1005-1012 (2018)
- Niemeyer, I. et al.: Safeguarding Geological Repositories Using Geo-physical Monitoring and Satellite Imagery. Proc. Institute of Nuclear Materials Management 59th Annual Meeting, Baltimore, USA, 22-26 Jul 2018
- Rutkowski, J. et al.: Comparison of software applications for German site operator's additional protocol declarations. Proc. Institute of Nuclear Materials Management 59th Annual Meeting, Baltimore, USA, 22-26 Jul 2018



## **Information zu Publikationen sowie zu Aus- und Weiterbildung**

In den Halbjahresberichten werden in kurzgefasster Form die Ergebnisse der laufenden Forschungsvorhaben dargestellt. Vorhabenrelevante Publikationen werden, soweit es der Platz zulässt, zwar aufgelistet, es ist aber nicht immer möglich alle Veröffentlichungen (schriftlich oder mündlich) aufzunehmen. Ferner waren bisher Informationen zu Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen nicht explizit aufgenommen worden.

Es wurde daher vereinbart, zukünftig die Gesamtzahl der Publikationen zu nennen und Informationen zu Ausbildungsaspekten zu geben. Zahlen wurden von den Vorhabennehmern zur Verfügung gestellt und das Jahr 2015 als Referenz ausgewählt.

Diese zusammenfassende Darstellung wird im jährlichen Rhythmus erfolgen, d. h. sie wird jeweils im zweiten Halbjahresbericht erscheinen. Damit soll - zusätzlich zur Kurzdarstellung der Vorhabenergebnisse - dokumentiert werden, dass und wie die Ergebnisse verbreitet, bekanntgemacht und publiziert werden. Basierend auf den Rückmeldungen wurde die folgende Zusammenstellung vorgenommen.

### **Publikationen**

Im Jahr 2017 wurden rund 260 Veröffentlichungen in begutachteten Journalen, in Form von Schlussberichten, Doktor-, Master-, Bachelor- und Studienarbeiten gemacht. Davon sind ca. 45 % Universitäten, ca. 24 % Einrichtungen der Helmholtz Gemeinschaft und ca. 31 % sonstigen Forschungseinrichtungen und Firmen zuzuordnen.

Im Jahr 2017 wurden auf Konferenzen, bei Workshops und sonstigen Veranstaltungen mehr als 220 Vorträge gehalten und Ergebnisse präsentiert. Davon entfielen ca. 46 % auf Universitäten, ca. 20 % auf Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft und ca. 34 % auf Forschungseinrichtungen und Firmen.

### **Aus- und Weiterbildung**

Ein strategisches Forschungsziel der BMWi-Förderung ist die Bereitstellung von Expertise und Wissen, der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und als wichtiges Element dabei 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 von Studenten im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation zwischen Universitäten und Firmen.

Im Jahr 2017 waren 80 Nachwuchswissenschaftler in FuE-Vorhaben eingebunden.





### 3 Verzeichnis der Forschungsstellen

<b>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover</b>		
02 E 11395	Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschiechten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA)	80
<b>Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 12200 Berlin</b>		
02 E 11537	Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt A	142
1501509	Langzeitverhalten von Metall- und Elastomerdichtungen sowie Polyethylen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (LaMEP)	18
1501561	Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK	32
<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 11294	Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA)	54
02 E 11385	Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA)	78
02 E 11405A	Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschiechten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt A	82
02 E 11486B	Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B	130
02 E 11526B	Verbundprojekt: Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern (CREATIEF), Teilprojekt B	138
02 E 11527	Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt A	140

02 E 11577A Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlager-  
systemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A 📖 156

02 E 11617A Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskon-  
zeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle  
im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt A 📖 174

**Dr. Andreas Hampel, Grünberger Str. 56, 55129 Mainz**

02 E 11446A Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgs-  
mechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz  
(WEIMOS), Teilprojekt A 📖 108

**Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Domstr. 11, 17489 Greifswald**

02 E 11344C Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrie-  
ren; Teilproject C 📖 70

**Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich**

02 E 11607D Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungspro-  
dukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und  
Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt D 📖 172

02 W 6263 Neu- und Weiterentwicklung von Safeguardstechniken und -methoden 📖 190

**Freie Universität Berlin, Kaiserwerther Str. 16-18, 14195 Berlin**

02 E 11547C Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-  
technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Ab-  
fälle (SOTEC-radio), Teilprojekt C 📖 148

**Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Schwertnergasse 1, 50667 Köln**

02 E 11072A Verbundprojekt WEIMAR: Weiterentwicklung des Smart-K<sub>d</sub>-  
Konzepts für Langzeitsicherheitsanalysen – Teilprojekt GRS 📖 42

02 E 11102 Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit  
von Endlagern 📖 44

02 E 11243 Langzeitsicherer Schachtverschluss im Salinar – Ergänzende laborati-  
ve und modelltheoretische Untersuchungen zum HM-gekoppelten Re-  
kompaktionsverhalten der EDZ(LASA-EDZ) 📖 50
















02 E 11284 Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-  
Nahfeld (BIGBEN) 📖 52




02 E 11304 Tonforschung im Untertagelabor Mont-Terri 📖 56

02 E 11314 Ermittlung der Stabilitätsbandbreiten redoxdeterminierender eisenhal-  
tiger Korrosionsphasen (KORPHA) 📖 58





02 E 11324 Entwicklung eines chemisch-hydraulischen Modells für die Prognose  
des Langzeitverhaltens von Salzbeton in Salzformationen (LAVA-2) 📖 60

02 E 11334A Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experi-  
menteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger  
salinärer Lösungen; Teilprojekt A 📖 62


- 02 E 11344A** Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt A  66
- 02 E 11365** Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)  76
- 02 E 11405B** Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt B  84
- 02 E 11456B** Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e<sup>2</sup>), Teilprojekt B  120
- 02 E 11466** Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)  122
- 02 E 11476A** Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A  124
- 02 E 11486A** Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A  128
- 02 E 11496A** Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt A  132
- 02 E 11567B** Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH<sup>2</sup>M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt B  154
- 02 E 11577B** Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B  158
- 02 E 11587B** Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt B  162
- 02 E 11607A** Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A  166
- 02 E 11617B** Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt B  176
- 02 E 11627** Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)  178
- 02 E 11647** Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)  186

- RS1552** Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung  34
- 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


**Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstraße 400 (B6), 01328 Dresden**

- 02 E 11334B** Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt B  64
- 02 E 11344B** Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt B  68
- 02 E 11415B** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B  90
- 02 E 11607B** Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B  168



**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  182

**Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau**

- 1501518B** Verbundvorhaben: Grundlegende F&E-Arbeiten zu Methoden der Zustandsüberwachung von Transport und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Akustische Messverfahren  24

**IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstr. 60, 04279 Leipzig**

- 02 E 11405C** Verbundprojekt: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA), Teilprojekt C  86
- 02 E 11446B** Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B  110

<b>Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstraße 21, 55122 Mainz</b>
---

- 02 E 11415A Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A 📖 88

<b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main</b>
--

- 02 E 11476B Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt B 📖 126

<b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe</b>
--

- 02 E 11355 Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander) 📖 74
- 02 E 11587A Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt A 📖 160
- 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 📖 184

<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 📖 112
- 1501560 Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK) 📖 30

<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 sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt A 📖 144

<b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Seminarstr. 2, 69117 Heidelberg</b>
---

- 02 E 11415H Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H 📖 102

<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen</b>
---

- 02 E 11415C Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt C 📖 92
- 02 E 11547B Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B 📖 146
- 02 E 11456A Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e<sup>2</sup>), Teilprojekt A 📖 118

02 E 11496B Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt B 📖 134

02 E 11607C Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C 📖 170

**Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestraße 6, 09599 Freiberg**

02 E 11193A Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen 📖 46

02 E 11435 MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl<sub>2</sub>-Lösung (MgO-SEAL) 📖 106

02 E 11526A Verbundprojekt: Untersuchungen zu Chancen und Risiken der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente in Tiefen Bohrlöchern (CREATIEF), Teilprojekt A 📖 136

02 E 11557 Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GESAV II) 📖 150

**Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Pockelsstr. 14, 38106 Braunschweig**

02 E 11446D Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D 📖 114

**Technische Universität Clausthal, Adolph-Römer-Straße 2A, 38678 Clausthal-Zellerfeld**

02 E 11425 Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken – Bautechnische Realisierung Technikumsprüfstand mit Durchführung und Auswertung erster Versuche (Salzschnittblöcke) 📖 104

02 E 11446E Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E 📖 116

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 📖 152

02 E 11597 Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase II: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel (STROEFUN-II) 📖 164

**Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt**

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 📖 180

<b>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden</b>
--

- |             |  |       |
|-------------|--|-------|
| 02 E 11415G | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G   | 📖 100 |
| 1501510     | Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (StrukElast)  | 📖 20  |
| 1501518A    | Verbundvorhaben: Grundlegende F&E-Arbeiten zu Methoden der Zustandsüberwachung von Transport und Lagerbehältern für abgebrannte Brennelemente und wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle bei verlängerter Zwischenlagerung – Teilvorhaben: Analysen zu strahlungs-basierten und thermographischen Messverfahren | 📖 22  |

<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 | 📖 26 |
| 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       | 📖 28 |

<b>Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München</b>
--

- |             |  |      |
|-------------|--|------|
| 02 E 11344D | Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt D                       | 📖 72 |
| 02 E 11415E | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt E | 📖 96 |

<b>Universität des Saarlandes, Campus Saarbrücken, 66123 Saarbrücken</b>
--

- |             |  |      |
|-------------|--|------|
| 02 E 11415D | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D | 📖 94 |
|-------------|--|------|

<b>Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam</b>
---

- |             |  |      |
|-------------|--|------|
| 02 E 11415F | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F | 📖 98 |
|-------------|--|------|