

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

PTE Nr. 56

BMWi geförderte FuE-Vorhaben zur
„Entsorgung radioaktiver Abfälle“

Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2018

Projekträger Karlsruhe (PTKA)
Entsorgung

Juni 2019

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

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

1	Verzeichnis der Vorhaben gemäß FuE-Bereiche	1
1.1	<i>Auswirkung verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl</i>	<i>3</i>
1.3	<i>Endlagerkonzepte und Endlagertechnik.....</i>	<i>5</i>
1.4	<i>Sicherheitsnachweis</i>	<i>9</i>
1.5	<i>Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen.....</i>	<i>13</i>
1.6	<i>Kernmaterialüberwachung.....</i>	<i>15</i>
2	Formalisierte Zwischenberichte	17
2.1	VORHABEN BEREICH 1	17
2.2	VORHABEN BEREICH 2 bis 5	43
2.3	VORHABEN BEREICH 6	199
	Information zu Publikationen sowie zu Aus- und Weiterbildung.....	201
3	Verzeichnis der Forschungsstellen	203

1 Verzeichnis der Vorhaben gemäß FuE-Bereiche

1.1 Auswirkung verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter

1501509	Langzeitverhalten von Metall- und Elastomerdichtungen sowie Polyethylen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (LaMEP)	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin	📖 18
1501510	Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (StrukElast)	TU Dresden	📖 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 strahlungsbasierten und thermographischen Messverfahren	TU Dresden	📖 22
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	Hochschule Zittau/Görlitz	📖 24
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	TU Kaiserslautern	📖 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	TU Kaiserslautern	📖 28

1501560	Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK)	Leibniz Universität Hannover	📖 30
1501561	Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin	📖 32
1501576	ProCast - Probabilistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., München	📖 34
RS1552	Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 36
RS1553A	Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung („ProbBau“)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 38
RS1563	Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 40

1.2 Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl

- | | | | |
|--------------------|--|--|-------|
| 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 | TU Darmstadt | 📖 160 |
| 02 E 11637B | Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt B: Multiskalenansatz | Helmholtz-Zentrum
Potsdam Deutsches
GeoForschungsZentrum
GFZ, Potsdam | 📖 162 |
| 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 | Karlsruher Institut
für Technologie
(KIT) | 📖 164 |

1.3 Endlagerkonzepte und Endlagertechnik

02 E 11193A	Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen	Technische Universität Bergakademie Freiberg	📖 44
02 E 11193B	Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen	BGE Technology GmbH, Peine	📖 46
02 E 11294	Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA)	BGE Technology GmbH, Peine	📖 50
02 E 11385	Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA)	BGE Technology GmbH, Peine	📖 72
02 E 11425	Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken – Bautechnische Realisierung Technikumsprüfstand mit Durchführung und Auswertung erster Versuche (Salzschnittblöcke)	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 90
02 E 11435	MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl ₂ -Lösung (MgO-SEAL)	Technische Universität Bergakademie Freiberg	📖 92
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	BGE Technology GmbH, Peine	📖 122
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 B	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin	📖 124
02 E 11557	Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GE-SAV II)	Technische Universität Bergakademie Freiberg	📖 132
02 E 11577A	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A	BGE Technology GmbH, Peine	📖 138

02 E 11587A	Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt A	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 142
02 E 11587B	Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt B	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 144
02 E 11617A	Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt A	BGE Technology GmbH, Peine	📖 154
02 E 11627	Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 158
02 E 11678	Untersuchungen zur Vervollständigung von Stoffmodellen für Salz- oder Sorelbeton sowie spezieller low-ph und hochdichter bzw. hochfester Betone zum rechnerischen Nachweis der Rissbeschränkung für Bauwerke (UVERSTOFF)	BGE Technology GmbH, Peine	📖 178
02 E 11688	Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III)	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 180
02 E 11698	Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwirkungen auf zementbasierte Dichtelemente (THYMECZ)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 182
02 E 11708A	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 184
02 E 11708B	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B	BGE Technology GmbH, Peine	📖 186
02 E 11708C	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig	📖 188
02 E 11708D	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 190
02 E 11718A	Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A	BGE Technology GmbH, Peine	📖 192
02 E 11718B	Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B	DMT GmbH & Co. KG, Essen	📖 194

02 E 11728 Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein (KORREKT) **BGE Technology GmbH, Peine**  196

1.4 Sicherheitsnachweis

02 E 11284	Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld (BIGBEN)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 48
02 E 11304	Tonforschung im Untertagelabor Mont-Terri	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 52
02 E 11314	Ermittlung der Stabilitätsbandbreiten redoxdeterminierender eisenhaltiger Korrosionsphasen (KORPHA)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 54
02 E 11334A	Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 56
02 E 11334B	Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden	📖 58
02 E 11344A	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 60
02 E 11344B	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 62
02 E 11344C	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt C	Universität Greifswald	📖 64
02 E 11344D	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt D	TU München	📖 66
02 E 11365	Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 70
02 E 11415A	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A	Johannes-Gutenberg Universität Mainz	📖 74
02 E 11415B	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden	📖 76

02 E 11415C	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt C	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein- Leopoldshafen	📖 78
02 E 11415D	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D	Universität des Saar- landes, Saarbrücken	📖 80
02 E 11415E	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt E	TU München	📖 82
02 E 11415F	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F	Universität Potsdam	📖 84
02 E 11415G	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G	TU Dresden	📖 86
02 E 11415H	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H	Ruprecht-Karls- Universität Heidel- berg	📖 88
02 E 11446A	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt A	Dr. Andreas Hampel, Mainz	📖 94
02 E 11446B	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B	IfG Institut für Ge- birgsmechanik GmbH, Leipzig	📖 96
02 E 11446C	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt C	Leibniz Universität Hannover	📖 98
02 E 11446D	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D	TU Carolo- Wilhelmina zu Braunschweig	📖 100
02 E 11446E	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 102
02 E 11456A	Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLO-RADO- e^2), Teilprojekt A	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein- Leopoldshafen	📖 104

02 E 11456B	Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e^2), Teilprojekt B	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 106
02 E 11466	Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 108
02 E 11476A	Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 110
02 E 11476B	Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt B	Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main	 112
02 E 11486A	Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 114
02 E 11486B	Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B	BGE Technology GmbH, Peine	 116
02 E 11496A	Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 118
02 E 11496B	Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt B	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen	 120
02 E 11567A	Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH ² M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt A	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	 134
02 E 11567B	Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH ² M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt B	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 136
02 E 11577B	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 140

02 E 11607A	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 146
02 E 11607B	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 148
02 E 11607C	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen	📖 150
02 E 11607D	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt D	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 152
02 E 11617B	Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt B	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 156
02 E 11647	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 166
02 E 11658A	Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 168
02 E 11658B	Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt B	BGE Technology GmbH, Peine	📖 170
02 E 11668A	Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 172
02 E 11668B	Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 174
02 E 11668C	Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen	📖 176

1.5 Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen

- | | | | |
|--------------------|--|--|-------|
| 02 E 11355 | Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander) | Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | 📖 68 |
| 02 E 11547A | Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt A | Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V. | 📖 126 |
| 02 E 11547B | Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B | Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen | 📖 128 |
| 02 E 11547C | Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt C | Freie Universität Berlin | 📖 130 |

1.6 Kernmaterialüberwachung

2 Formalisierte Zwischenberichte

2.1 Vorhaben Bereich 1

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 12200 Berlin		Förderkennzeichen: 1501509
Vorhabensbezeichnung: Langzeitverhalten von Metall- und Elastomerdichtungen sowie Polyethylen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (LaMEP)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2015 bis 30.04.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 373.351,03 EUR	Projektleiter: 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

Metalldichtungen (M):

Zur Generierung neuer Erkenntnisse über das Verhalten von Metalldichtungen nach thermischer Belastung sollen experimentelle Untersuchungen an vorgealterten Dichtungen durchgeführt sowie Materialmodelle zur rechnerischen Abschätzung des Langzeitverhaltens der Metalldichtungen 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. Die Messungen wurden an Dichtungen mit großem Durchmesser nach Alterungsdauern zwischen 4,5 und 9,5 Jahren bei verschiedenen Temperaturen (RT, 75 °C, 100 °C, 125 °C und 150 °C) durchgeführt. Weiterhin wurden Dichtungen mit kleinem Durchmesser nach 3 Jahren Alterung untersucht. Die Messergebnisse zeigten eine konsequente Fortsetzung der bisher beobachteten Trends, d. h. der Abnahme von Verpresskraft und nutzbarer Rückstellung. Untersuchungen an 1,5 Jahre gealterten, assemblierten Vergleichsflanschen mit Al-Dichtungen beider Durchmesser führten zu ähnlichen Ergebnissen wie bei den Ursprungsflanschen. Darüber hinaus wurden die Messungen der Dichtspurbreite an Dichtungssegmenten für Alterungszeiten bis 300 Tage abgeschlossen. Auch diese bestätigen bereits vorliegende Ergebnisse, d. h. das Vorhandensein einer Seite mit einer breiteren und einer Seite mit einer schmaleren Dichtspur.
- E: Bei den eingelagerten Elastomerdichtungen erfolgte eine weitere Probenentnahme nach einer Alterungsdauer von 4,3 Jahren. Die Messergebnisse führen ebenfalls die bisher beobachteten Verläufe, bspw. den beständigen Anstieg der Druckverformungsrestwerte fort.
- P: Die ersten Teilergebnisse zum Materialverhalten der Polymere unter Bestrahlung bei erhöhten Temperaturen liegen vor. Die Charakterisierung der Proben sowie die finale Auswertung sind derzeit noch laufend.

4. Geplante Weiterarbeiten

- M: Fortführung der Untersuchungen an gealterten Metaldichtungen sowie der numerischen bzw. analytischen Arbeiten (Bereitstellung Materialparameter und -modelle, Beschreibung des Kraft-Verformungsverhaltens der Dichtungen, Abschätzung des Langzeitverhaltens).
- E: Fortführung der Arbeiten an Modellen zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens der Elastomerdichtungen sowie deren fortlaufende Evaluierung.
- P: Abschluss der Arbeiten zur radiologischen Probenalterung und Fortführung der Untersuchungen zur thermischen Alterung des Polyethylens.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum wurden folgende Beiträge auf Konferenzen publiziert:

- T. Grelle et al.: „Investigation of Time and Temperature Dependent Behavior of Metal Seals in Radioactive Waste Containers”; ASME PVP 2018; Prag; Tschechische Republik
- M. Jaunich et al.: “Long Term Performance of Elastomer Seals – From Aging Tests to Lifetime Estimations; ASME PVP 2018; Prag Tschechische Republik
- J. Beckmann et al.: “THz- and IR-Fourier Transform Spectroscopy on Physical Aged Polyethylene”; 43rd IRMMW-THZ; 2018; Nagoya, Japan

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 1501510
Vorhabensbezeichnung: Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (StrukElast)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2015 bis 30.04.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 208.642,28 EUR	Projektleiter: 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 Werkstoffigenschaften 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 Vulkanisation und Nachvernetzung von Modell-O-Ringen für die noch ausstehenden HNBR-Rezepturen wurde abgeschlossen.
- AP3: Messungen des Quellgrades an 500 h gealterten O-Ring-Segmenten (EPDM) zeigten, dass mit zunehmender Alterungszeit alle EPDM-Rezepturen eine Verringerung des Quellgrades aufweisen, die mit einer Zunahme der Vernetzungsdichte durch Nachvernetzungsreaktionen korrespondiert. Die Ergebnisse unterstreichen den dominanten Effekt der initialen Vernetzungsdichte auf die Alterungsstabilität bei EPDM-Rezepturen.
- AP4: Aus Druckspannungsrelaxationsmessungen an FKM-Proben konnte als mögliches Ausfallkriterium die Relaxationszeit bis 90 % Verlust der Dichtkraft abgeleitet werden. Die FKM-Proben zeigten erwartungsgemäß nur einen geringen Abfall der Dichtkraft.
- AP5: Bei der Charakterisierung des frequenzabhängigen viskoelastischen Materialverhaltens ungealterter EPDM-Rezepturen konnte nur ein geringfügiger Einfluss reduzierter Vernetzungsmittelmengen in den Rezepturen festgestellt werden.
- AP6: Für die Anpassung der Masterkurven mittels Multi-Skalen-Fit konnten (für HNBR-Rezepturen) zwei Algorithmen zur bereichsweisen Definition der Startwerte der Fitparameter erfolgreich getestet werden.
- AP7: In multivariaten Analysen an FKM-Rezepturen konnte nur ein geringer Einfluss von Füllstoffgehalt und initialer Vernetzungsdichte auf den Druckverformungsrest (DVR) nach Alterung bei 150 °C festgestellt werden. Hohe initiale Vernetzungsdichte bei geringem Füllstoffgehalt bedingte dabei kleinere DVR-Werte.
- AP8: Die alterungsabhängigen DVR von EPDM-Segmenten mit reduzierter Vernetzungsmittelmenge weisen einen deutlichen Einfluss der initialen Vernetzungsdichte auf. Bei Unterschreitung einer kritischen Vernetzungsdichte werden DVR-Werte ermittelt, die auf einen vollständigen Verlust der Dichtfunktion schließen lassen. Ein Vergleich der im Vorhaben ermittelten DVR-Werte mit Daten von Praxissystemen bestätigte den Einfluss des Basis kautschuktyps auf das Alterungsverhalten, wobei die Modellrezepturen aus dem Vorhaben tendenziell schneller altern.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Ermittlung der ausstehenden DVR-Werte, Quellgrade und Vernetzungsdichten von 1000 h verpresst gealterten O-Ring-Segmenten.
- AP3: Durchführung von Gleichgewichtsquelluntersuchungen für ausstehende Proben.
- AP4: Ermittlung mechanischer Kenngrößen für ausstehende Alterungszeiten.
- AP5: Fortsetzung der DMA-Analyse an gealterten EPDM-Rezepturen.
- AP6: Fortführung der Multi-Skalen-Fits an Masterkurven.
- AP7: Fortführung multivariaten Analysen zur Korrelationserstellung.
- AP8: Fortführung der Werkstoffcharakterisierung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- E. S. Bhagavatheswaran et al.: „Longterm performance study of EPDM, FKM, HNBR and VMQ rubbers for O-Ring applications“; Deutsche Kautschuk-Tagung (DKT) 2018; Nürnberg, Deutschland
- E. S. Bhagavatheswaran et al.: „Comparative Investigations of the Influence of Material Formulation on the Aging Behavior of FKM, VMQ, EPDM and HNBR Elastomers for Sealing Applications“; International Rubber Conference (IRC) 2018; Kuala Lumpur, Malaysia

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 1501518A
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2016 bis 31.01.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 413.887,23 EUR	Projektleiter: 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: Zur Bestimmung der Verteilung des Neutronenflusses außerhalb der Seitenwände sowie oberhalb des TLB wurden MCNP6-Simulationen mit dem TLB-Geometriemodell aus den Gammaflussberechnungen durchgeführt. Dabei wurde sowohl der Fall intakter BE als auch verschiedene Szenarien der BE-Schädigung betrachtet (Absacken von Brennstoff um 9cm in je einem BE an unterschiedlichen Positionen im TLB). Als Inventar wurden DWR-BE mit einem Abbrand von rund 56,79 GWd/tHM angenommen. Die Neutronen-Quellverteilungen wurden mithilfe des SOURCES-4C-Codes bestimmt. Die Berechnungen zeigten, dass Intensität und Verteilung des Neutronenflusses an den Seitenflächen des TLB ausreichend sind um beschädigte (außen und innen gelagerte) BE zu identifizieren. Darüber hinaus erscheint eine Ermittlung der Winkelposition des beschädigten BE anhand des messbaren Gamma- und Neutronenflusses oberhalb des TLB möglich.
- AP5: Recherchen zu Detektorkonzepten für Myonen-Messungen an TLB ergaben, dass sich für die experimentellen Untersuchungen im Vorhaben RPC-Detektoren und Straw Tube Tracker eignen würden. Um die erforderliche Winkelauflösung zu erhalten, wäre eine hohe Anzahl an Kanälen und folglich eine aufwändige elektronische Auslese der Messdaten erforderlich.
- AP6: Es wurden CFD-Simulationen für ein Modell des CASTOR V/19 mit ANSYS Fluent 18.1 durchgeführt. Im Fokus standen dabei Szenarien mit massiven Verlagerungen von Brennstoff im TLB-Innenraum. Die Grundlage für die Simulationen bildeten Versuche am Thermographie-Versuchsstand. Die dabei ermittelten maximalen Temperaturdifferenzen an der TLB-Außenwand zwischen Normalzustand und Schädigungsszenarien lagen für 40 Jahre Lagerzeit bereits unter 1 K. Für 120 Jahre Lagerzeit betragen diese weniger als 0,3 K. Die Verwendung einer temporären thermischen Isolierung an der Mantelfläche erhöhte in den Simulationen zwar die Oberflächentemperatur des TLB, der Kontrast zwischen beschädigten und unbeschädigten BE blieb jedoch weitgehend unverändert. Auf Basis der Resultate im Vorhaben wird empfohlen, die Thermographie in einem Monitoring-Konzept nicht zu berücksichtigen.
- AP10: Das erstellte Verfahrenskonzept wurde gemäß den aktuellen Resultaten im Vorhaben angepasst.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP6: Untersuchung der Unterschiede von numerisch ermittelten und am Versuchsstand gemessenen Temperaturen im oberen Bereich des verwendeten Modellbehälters.
- AP10: Fortlaufende Anpassung des Verfahrenskonzepts.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum wurden folgende Veröffentlichung getätigt:

U. Hampel et al.: "Investigations on potential methods for the long-term monitoring of the state of fuel elements in dry storage casks"; Kerntechnik, 83(6); 513-522, 2018

Zuwendungsempfänger: Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		Förderkennzeichen: 1501518B
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2016 bis 31.01.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 750.814,95 EUR	Projektleiter: 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: In Experimenten zur Gammastrahlungsemission wurden trotz annähernd symmetrischer Bedingungen wiederholt unsymmetrische Gammastrahlungsverteilungen an der Außenseite des CASTOR V/19-Modells gemessen. Weiterhin ergaben sich hohe Abweichungen zwischen numerisch und experimentell ermittelten Werten. In ergänzenden Versuchen zeigte sich, dass die Absorptionsraten der eingesetzten Gammastrahlungsdetektoren tagesabhängig variieren. Weiterhin wurden experimentspezifische Abschirmeigenschaften des TLB-Modells festgestellt, die auf die grobe Passung der BE-Dummies im Tragekorbmodell zurückzuführen sind.

Bezüglich der Messmethode Thermographie wurden experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der äußerlichen konvektiven Bedingungen (im Labor) auf die Oberflächentemperatur des eingesetzten TLB-Modells durchgeführt.

AP9: Zur Untersuchung der Messmethode aktive akustische Schwingungsspektroskopie (Schwingungsanalyse) wurden zwei Experimente durchgeführt. Im ersten Experiment konnte gezeigt werden, dass Änderungen der Massen im CASTOR V/19-Modell in unterschiedlichen Schwingungsantworten resultieren. Nach Analyse der Schwingungsantworten ließen sich Frequenzunterschiede in den Frequenzspektren der untersuchten Zustände des Behälterinventars erkennen. Diese ließen sich prinzipiell für eine Erkennung von Zustandsveränderungen im TLB nutzen. Im zweiten Experiment konnte außerdem festgestellt werden, dass die ermittelten Frequenzspektren abhängig von der Temperatur im CASTOR V/19-Modell sind. Die Schwingungsanalyse lässt somit Rückschlüsse auf die globale Temperatur im Inneren des Behälters zu.

Zur Messmethode der passiven akustischen Schwingungsspektroskopie wurde die Abhängigkeit des max. Schalldruckpegels beim Bersten eines (Modell-)Hüllrohres vom Berstdruck ermittelt. Weiterhin wurde untersucht, ob der Schalldruckpegel beim Rohrbersten im TLB von außen detektierbar ist. In den Experimenten wurde bei einem Berstdruck von 93 bar ein Schalldruckpegel von ca. 133 dB gemessen. Die Schalldämpfung eines TLB wurde mit ca. 80 dB abgeschätzt, eine Detektion von außen ist somit prinzipiell möglich. Weitere Experimente zum Versagen von Rohren bei Innendruck zeigten, dass hierbei breite Bruchöffnungen entstehen können. Ein Brennstoffaustritt nach Hüllrohrversagen eines BE im TLB wäre demzufolge theoretisch möglich.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP8: Ermittlung der physikalischen Effekte mit wesentlichem Einfluss auf die Absorptionsrate der eingesetzten Gammastrahlungsdetektoren.

AP9: Durchführung von Berstversuchen mit wasserstoffversprödeten Rohren.

AP10: Fortlaufende Anpassung des Monitoring-Konzepts.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Kratzsch A. et al.; „Methoden zum nichtinvasiven Monitoring von Trockenlagerbehältern mit abgebrannten Brennelementen im Zwischenlager; 50. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden 2018

Fiß D.; “Selected experimental and simulative results in the cooperative project DCS-Monitor”; Doktorandenseminar Kompetenzzentrum Ost für Kerntechnik; Zittau 2018

Zuwendungsempfänger: Technische Hochschule Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Straße, 67663 Kaiserslautern		Förderkennzeichen: 1501538A
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
Laufzeit des Vorhabens: 15.02.2017 bis 31.07.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 460.820,88 EUR	Projektleiter: 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: Die Parameterstudie für das analytische Zweimassenmodell für den weichen Stoß wurde durch weitere Versuche ergänzt. Das Modell zeigt für stoßbeanspruchte Stahlbetonstrukturen auch unter Verwendung verschiedener Rand- und Lagerungsbedingungen gute Resultate. Hinsichtlich der Untersuchungen des harten Stoßes mit dem in der Entwicklung befindlichen, erweiterten Zweimassenschwinger wurden Recherchen zu weiteren Ansätzen bezüglich der Kontaktkraftgesetze durchgeführt und mit deren Implementierung in das Modell begonnen.
- AP2: Zur Untersuchung der Funktionsweise der PML-Elemente in LS-Dyna wurden diverse Parameterstudien durchgeführt. Dabei wurden die Einflüsse der Elementgröße, der gewählten PML-Schichtdicke und der Abstand zur Anregungsquelle untersucht. Anhand der durchgeführten Parameterstudie zu PML-Elementen wurde festgestellt, dass die in der Literatur häufig empfohlene Elementkantenlänge von 1/6 bis 1/8 der Scherwellenlänge für eine präzise Berechnung nicht ausrei-

chend ist. Mit einer Elementgröße von $1/16$ der Scherwellenlänge konnten hingegen gute Ergebnisse erzielt werden.

- AP3: Das Verhalten von Stahlbetonstrukturen beim Aufprall von Turbinen wurde mittels der in AP5 erstellten Turbinenmodelle untersucht. Die Geometrie sowie Masse und deren Verteilung wird aus mehreren Hauptkomponenten aufgebaut, wie bspw. feststehender Kranz, Turbinenwelle, Hauptrotor der Turbine mit einzelnen vereinfachten Schaufeln, Massen aus Aggregaten und Anbauten und einer äußeren zylindrischen Schale, die die inneren Komponenten miteinander verbindet. Als erste Untersuchung zur Bestimmung der lokalen Grenztragfähigkeit beim lokalen Aufprall einer Turbine wurde die Aufprallgeschwindigkeit soweit erhöht bis es zu einer Durchdringung der Betonstruktur kam.
- AP4: Im Rahmen der Teilnahme am IRIS 3 Benchmark wurden für die Phase B (Kalibrierung der Berechnungsmodelle unter Verwendung der experimentellen Ergebnisse) beispielsweise folgende Anpassungen am Modell aus Phase A durchgeführt: Variation von Betonmodellen (u. a. Winfrith), Anpassung der Zeitschritte und Untersuchung verschiedener Hourglass-Ansätze. Die Analysen der Projektilresultate, darunter die Auswertung der Projektilverschiebungen, der Kontaktkräfte, der Last-Zeit-Funktion und dem Impuls zeigen bei allen Projektilen gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Daten und analytischen Modellen wie der Methode nach Riera. Das Nachschwingverhalten der von den Projektilen getroffenen Frontseite des Mock-ups konnte infolge der Anpassungen zwar deutlich verbessert werden, allerdings findet dennoch eine zu große Energiedissipation statt, so dass die Betonstruktur zu schnell ausschwingt. Die Schwingungsfrequenz stimmt mit den experimentellen Daten gut überein.
- AP5: Zur Untersuchung des Lastfalls Turbinenaufprall auf ein Zwischenlager (STEAG Konzept) wird der Anprallbereich der Zwischenlageroberfläche diskret modelliert, um die lokalen plastischen Effekte abzubilden. Die Stahlbetonwand wird durch 3D-Volumenelemente und die Bewehrung durch darin eingebettete Stabelemente repräsentiert. Um die Volumenelemente des diskretisierten Bereichs mit den Schalenelementen der Außenhülle zu verbinden, wird eine mit der Außenseite des 3D-Bereiches fest verbundene Schale erstellt. Die Verschiebungen dieser Schale werden mit der Schale der Außenhülle gekoppelt, so dass der Verbund hergestellt werden kann.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Erkenntnisse aus den Parameterstudien zum Zweimassenmodell sollen in die Entwicklung eines vereinfachten analytischen Modells für den harten, nicht verformbaren Stoß, einfließen.
- AP2: Die Effektivität und Brauchbarkeit der PML-Methode soll an weiteren Beispielen, wie dem modellierten Zwischenlager, im Frequenz- und Zeitbereich untersucht und bewertet werden.
- AP3: Nächste Arbeitsschritte bestehen in der Durchführung weiterer Simulationen unter Parametervariation.
- AP4: Aufgrund einer Verlängerung der Bearbeitungszeit der Phase B sollen weitere Untersuchungen und Anpassungen am Modell durchgeführt werden. Ziel soll es sein, herauszufinden, warum insbesondere die Vorderseite des Mock-ups zu stark gedämpft wird und offensichtlich zu viel Energie dissipiert.
- AP5: Zunächst sollen die entwickelten Turbinenmodelle unter Berücksichtigung einer deformierbaren Masse weiter verifiziert werden. Mit Hilfe der erstellten Modelle von Zwischenlager und Turbine sollen Fallbeispiele mit variierenden Turbinentypen sowie Aufprallgeschwindigkeiten getestet werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

In diesem Berichtszeitraum wurden keine Publikationen veröffentlicht.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str. 1, 67663 Kaiserslautern		Förderkennzeichen: 1501543B
Vorhabensbezeichnung: 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)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2017 bis 30.06.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 245.580,20 EUR	Projektleiter: 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

- AP4: Eine Besonderheit großer Betonquerschnitte von baulichen Strukturen stellen die damit verbundenen Umlagerungsmöglichkeiten dar, die zu einer deutlichen Tragfähigkeitssteigerung führen können. Um diese im Hinblick auf Zwischenlager quantifizieren zu können, wurden erste Versuche unter Variation von Betonfestigkeitsklasse durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Entwicklung von Probekörpern für weiterführende Versuche genutzt.
- AP5: In Bezug auf die Verwendung von Monitoring-Maßnahmen wurden in der Literatur Möglichkeiten von Monitoring-Maßnahmen insbesondere im Stahlbetonbau recherchiert. Darüber hinaus fand eine Ortsbegehung am Zwischenlagerstandort Philippsburg statt, um sich über eingesetzte Monitoring-Maßnahmen beim Alterungsmanagement von Zwischenlagern in der Kerntechnik zu informieren. Diese beschränken sich im Wesentlichen auf regelmäßig durchgeführte Sichtprüfungen zur Zustandsbeurteilung des Bauwerks.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Durchführung weiterführender Versuche, im Rahmen derer der Einfluss von Zuschlagsgröße, Zuschlagsart, Belastungsgeschwindigkeit und des Maßstabeffekts untersucht werden sollen. Darüber hinaus sollen Updating-Verfahren unter Beachtung von großen Querschnitten erläutert und weiterentwickelt werden.
- AP5: Untersuchung der Umsetzungsmöglichkeiten von Monitoring-Maßnahmen und Bewertung des potentiellen Einflusses solcher Maßnahmen auf die Nachrechnung von Bauwerken.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover		Förderkennzeichen: 1501560
Vorhabensbezeichnung: Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2017 bis 31.08.2021	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 206.081,00 EUR	Projektleiter: 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

- AP1: In Abstimmung mit der Framatome GmbH wurde Zircaloy 2 als Versuchswerkstoff für das Vorhaben ausgewählt. Erstes Material wurde für Untersuchungen bereitgestellt.
- AP2: Im Zuge der Werkstoffcharakterisierung wurden metallographische Schliffe erstellt und eine Präparationstechnik erarbeitet. Erste REM- und EDX-Untersuchungen zur Beurteilung der Mikrostruktur und der Materialzusammensetzung wurden durchgeführt.
- AP3: Erste Versuche zur Wasserstoffbeladung mittels Überdruckgasbeladung bei erhöhten Temperaturen wurden durchgeführt. Die dabei entstandene Hydridphase wurde mittels erster Analysen grob charakterisiert. Darüber hinaus wurde die Gesamtwasserstoffbeladung des verwendeten Werkstoffs mittels Schmelzextraktionsanalyse ermittelt.
- AP5: Für die Druckbelastungsversuche wurde ein Rohrprüfstand entworfen und konstruiert sowie eine Proben- und Belastungsplanung erstellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Diskussion der Versuchsdurchführung und -vorbereitung sowie bisheriger Ergebnisse.
- AP2: Fortführung der materialwissenschaftlichen Untersuchungen.
- AP3: Fortführung der Studien zur Wasserstoffbeladung und zur Veränderung des Materialverhaltens.
- AP5: Inbetriebnahme des Versuchsstandes für die Untersuchung des Spannungszustandes im Zr-Material.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 12200 Berlin		Förderkennzeichen: 1501561
Vorhabensbezeichnung: Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2018 bis 31.03.2021	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 254.513,00 EUR	Projektleiter: 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 Sprödbrochenanfälligkeit 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 Aufarbeitung des Standes von Wissenschaft und Technik zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens wurde fortgesetzt. Für diverse Zirkoniumlegierungen wurden Werkstoffdaten in Form von Fließkurven und Werkstoffkennwerten sowie experimentelle Ergebnisse aus Ring-Compression-Tests (RCTs) gefunden. Die in der Literatur recherchierten Ansätze und Modelle für die Beschreibung des Verformungsverhaltens von Brennstabhüllrohren wurden ausgewertet. Für die Legierung Zircaloy-4 wurde ein numerischer bruchmechanischer Ansatz identifiziert, in den die Hydridlänge, die Abstände der Hydride untereinander sowie ihre Ausrichtung und Form als Parameter eingehen.
- AP2: Zu Beginn der numerischen Analyse des Festigkeitsverhaltens im RCT wurde ein Finite-Elemente(FE)-Modell erstellt, welches das Verformungsverhalten von Brennstabhüllrohrabschnitten aus Zirkoniumlegierungen ohne sowie mit in Umfangsrichtung ausgerichteten Hydriden im RCT beschreiben kann. Für das Modell wurden Materialparameter abgeleitet, welche die Nachrechnung von RCT-Tests in der Literatur ermöglichen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Abschluss der Literaturrecherche.
- AP2: Fortsetzung der Analyse des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohrabschnitten und Erweiterung des FE-Modells zuerst mit einem (Untersuchung des Einflusses u. a. der Rissgeometrie) und im Anschluss mit mehreren Anrissen (Untersuchung des Einflusses von Rissfeldern).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27c, 80686 München		Förderkennzeichen: 1501576
Vorhabensbezeichnung: ProCast - Probabilistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
Laufzeit des Vorhabens: 15.10.2018 bis 14.10.2021	Berichtszeitraum: 15.10.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 806.546,89,00 EUR	Projektleiter: Dr. Hohe	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1 – Werkstoffversuche:

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

AP2 – Mikrostruktursimulation:

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

AP3 – Bruchmechanisches, probabilistisches Versagenskonzept:

Herleitung eines kombinierten Versagenskriteriums für duktiles und sprödes Versagen.

AP4 – Kontinuumsmechanische Versagensmodellierung:

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

AP5 – Ableiten eines probabilistischen Bewertungskonzepts:

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Es wurde ein Modellwerkstoff in Form eines unbenutzten TLBs beschafft (MOSAIK). Der Werkstoff (GJS-400) entspricht den üblichen Qualitätsanforderungen des Herstellers. Mit der Probenentnahmeplanung wurde begonnen.
- AP2: Vorliegende Methoden zur zufallsgesteuerten Mikrostrukturgenerierung wurden geprüft und erste Testrechnungen unter Verwendung von verfügbaren bzw. sinnvoll abgeschätzten Materialdaten durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der Mikrostrukturgeneratoren zu bewerten. Weiterhin wurde nach geeigneten spröden und duktilen Versagensmodellen auf Mikrostrukturebene für eine adäquate Versagensmodellierung recherchiert.
- AP3: Eine weitere Literaturrecherche befasste sich mit vorhandenen, für die Bewertung von GJS-400-Werkstoffen relevanten Kennwerten. Dabei wurden Festigkeitskennwerte (u. a. Spannungs-Dehnungs-Kurven, Bruchdehnung) sowie bruchmechanische Kennwerte (u. a. Risszähigkeit bei quasi-statischer Belastung) zusammengetragen. Die ermittelten Kennwerte sollen sowohl als Referenz zum Vergleich mit den Kennwerten des Modellwerkstoffs als auch zur Abschätzung derer statistischer Streuung herangezogen werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Beginn der Probenentnahme aus dem Modellwerkstoff, Durchführung von metallographischen Untersuchungen, Probenvorbereitung sowie Start des Versuchsprogramms.
- AP2: Untersuchung des Modellwerkstoffs im Hinblick auf die Form- und Größenverteilung der Grafiteinschlüsse sowie eine Adaption von verfügbaren Verfahren zur zufallsgesteuerten Generierung von Mikrostrukturmodellen auf Basis der Untersuchungsergebnisse.
- AP3: Implementierung der Werkstoffkennwerte aus der Literatur in eine Datenbank des Programms IWM VERB, Ableitung von statistischen Beschreibungen der Versagensgrenzkurve sowie Erstellung von repräsentativen Ersatzmodellen für kleine Risse an Grafiteinschlüssen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: RS1552
Vorhabensbezeichnung: Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung (BREZL)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2017 bis 31.03.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 923.990,00 EUR	Projektleiter: 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 Langzeittrockenlagerung sowie Austausch mit den in diese Forschung involvierten Forschungsstellen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Arbeiten zur Implementierung der Normen DIN 25463-1/2:2014 in das neu erstellte Programm zur Berechnung der Nachzerfallsleistung von LWR-Brennelementen (BE) wurde abgeschlossen. Um einen automatisierten Vergleich zwischen den Normen und Best-Estimate-Werten zu generieren, wurde eine Ansteuerung der Codes OREST und MOTIVE mittels eines Skripts realisiert und entsprechende Vergleichsrechnungen wurden durchgeführt. Daneben wurden Rechnungen zum OECD/NEA Blind-Benchmark zur Untersuchung der Genauigkeit und Streubreite von Rechenverfahren zur Bestimmung der Nachzerfallsleistung durchgeführt. Für die COBRA-SFS-Rechnungen wurde das Modell für die dreidimensionalen Temperaturfelder und das Modell des Behälterplenums verbessert sowie die Modellierung für transiente Rechnungen ertüchtigt.
- AP2: Bezüglich der Wasserstofflöslichkeit in Zirkoniumlegierungen wurde anhand der recherchierten Experimentaldaten eine detaillierte Unsicherheitsanalyse durchgeführt, wobei für verschiedene Datensätze Fitfunktionen bestimmt und analysiert wurden. In TESP-ROD wurden die Diffusionsgleichungen für den axialen Wasserstoff-Transport im Hüllrohr verfeinert und Analysen zur Langzeitlagerung durchgeführt. Daneben wurde an dem TESP-ROD-Modell zur Hydridausscheidung gearbeitet.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Fortführung der Arbeiten zum Blind-Benchmark und Ertüchtigung des COBRA-SFS-Modells für die Simulation von Trocknungsprozessen.
- AP2: Fortführung der Arbeiten zur makroskopischen Berechnung der Gestalt von Hydriden, Untersuchung des Werkstoffkriechens bei radial ausgerichteten Hydriden mittels FE-Methoden und Entwicklung eines Modells zur Ermittlung von Sprödbruch-Übergangstemperaturen für TESP-ROD.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

- F. Rowold et al.: "Open Questions on the road to reliable predictions"; Proc. Safety Ext. Dry Storage of SNF; Kerntechnik 83,6 (pp. 484-487); Dez. 2018
- F. Boldt et al.: "Research activities at GRS on fuel rod behavior during extended dry storage"; Proc. Safety Ext. Dry Storage of SNF; Kerntechnik 83,6 (pp. 476-483); Dez. 2018
- K. Hummelsheim et al.: "Report: GRS Workshop 'Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel'"; atw Vol. 63 (2018), Issue 8/9; Aug. 2018
- P. Kaufholz et al.: "Influence of kinetic effects on terminal solid solubility of hydrogen in Zirconium alloys"; Journal of Nuclear Materials Vol.10 (pp. 277-281) & arXiv:1805.00529 [cond-mat.mtrlsci]; Nov. 2018
- H.G. Sonnenburg: "TESP-ROD prediction of the fuel rod behavior during long-term storage"; 49th Annual Meeting of Nuclear Technology (AMNT); atw Vol. 63, Ausgabe 6-7; 2018

Beiträge zu Konferenzen:

- M. Peridis et al.: „Detailed temperature fields in loaded dry storage casks“ (Poster); NuMat2018, Seattle, USA; Okt. 2018
- F. Boldt et al.: "Statistical analysis of experimental data on terminal solid solubility of hydrogen in Zr-Alloys" (Poster); NuMat2018, Seattle, USA; Okt. 2018
- M. Stuke et al.: "Overview of Recent Research and Developments at GRS" (Vortrag); EPRI ESCP Winter 2018 Meeting; Charlotte USA; Nov. 2018

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: RS1553A
Vorhabensbezeichnung: Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung (ProbBau)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3		
Laufzeit des Vorhabens: 15.03.2017 bis 14.06.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 341.390,00 EUR	Projektleiter: 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: Im Rahmen des Besuchs des IPW2018 konnten weitere Erkenntnisse in Bezug auf die Bewertung der Zuverlässigkeit im konventionellen Bauwesen zur Normung der in den Eurocodes und FIB implementierten Verfahren gewonnen werden. U. a. wurde auf dem Workshop eine Teilsicherheitsbeiwert-Konzept für Bestandsbauwerke vorgestellt.
- AP2: Die Auswertung der Umfrage im Rahmen der OECD/NEA Aktivität ergab, dass kein Land die Zuverlässigkeit kerntechnisch sicherheitsrelevanter Bauwerke quantitativ in den normativen Dokumenten geregelt hat. Für die Bemessung scheinen durchweg konventionelle Baunormen angewendet zu werden. Auslegungsanforderungen haben zumeist eine rein deterministische Grundlage. Die Fortführung der Recherche zur Anpassung des Zuverlässigkeitsindex ergab, dass für neue Bauwerke die Zuverlässigkeitsindexe häufig gemäß der Norm ISO 2394:1998 angegeben werden. Diese Indexe hängen neben der Schadensfolgeklasse auch von relativen Kosten für Sicherheitsmaßnahmen ab. Generell werden an Bestandsbauwerke schwächere Anforderungen an die Zuverlässigkeit gestellt wie an Neubauten.
- AP3: Die Recherche zu Einwirkungen auf kerntechnische Bauwerke umfasste u. a. eine GRS-Studie zum Flugzeugabsturz (FLAB), in welcher die Absturzwahrscheinlichkeiten für alle Kraftwerksstandorte ermittelt wurden. In ausländischen Untersuchungen wird i. d. R. angenommen, dass ein Absturz zur Funktionsunfähigkeit aller sicherheitstechnisch relevanten Systeme im betroffenen Gebäude führt. In Bezug auf Erdbeben zeigte sich, dass für eine gute probabilistische Beschreibung auch die Erfassung und Charakterisierung sehr lang zurückliegender Erdbebenereignisse von Bedeutung ist.
- AP5: Eine erste Recherche zu mögliche Monitoring-Maßnahmen für kerntechnische Bauwerke zeigte, dass die zerstörungsfreien Prüfmethode des konventionellen Bauwesens in der Kerntechnik nicht anwendbar sind. Messmethoden zum Nachweis der Sicherheit kerntechnischer Bauwerke müssten erst noch entwickelt werden.
- AP6: Mit der Entwicklung einer Methodik für Ermittlung der tatsächlichen Zuverlässigkeit bestehender Bauwerke wurde begonnen und erste Bestandteile wurden festgelegt.
- AP7: Die Entwicklungsarbeiten an der Methodik für die zuverlässigkeitsorientierte Nachrechnung kerntechnischer Bauwerke wurden aufgenommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Abschließende Dokumentation der Rechercheergebnisse.
- AP2: Weitere Verfolgung des internationalen Standes in der Normenentwicklung.
- AP3: Fertigstellung des Abschlussberichts zur Umfrage im Rahmen der OECD/NEA Aktivität und Fortführung der Untersuchungen zur Auslegung und probabilistischen Bewertung kerntechnischer Bauwerke gegen äußere Einwirkungen.
- AP5: Fortsetzung der Recherche zu möglichen Monitoring-Maßnahmen.
- AP6: Durchführung einer Analyse zur Berücksichtigung von Monitoring-Maßnahmen bei der Ermittlung der vorhandenen Zuverlässigkeit bestehender Bauwerke.
- AP7: Definition der Bestandteile der Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung kerntechnischer Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: RS1563
Vorhabensbezeichnung: Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 1: Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf Abfälle u. Behälter, Feld 1.3	
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2018 bis 30.04.2021	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 520.315,00 EUR	Projektleiter: 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: Hinsichtlich der Modellierung der Mechanismen von Kriechen und Schwinden wurde der FIB Model Code 2010, der im Vergleich zum Eurocode 2 eine detailliertere Formulierung bereitstellt, für die Implementierung in MATLAB herangezogen. Mit diesem wurde begonnen, Experimente, die im Rahmen des VeRCoRs-Projektes durchgeführt wurden, nachzurechnen. Hinsichtlich der Modellierung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion wurden in nationalen und internationalen Normen und wissenschaftlichen Empfehlungen bisher keine spezifischen vereinfachten Berechnungsmethoden identifiziert, die eine Bewertung und Prognose zur Schädigung und Tragfähigkeit von Gebäudestrukturen ermöglichen.
- AP2: Die Untersuchung der Implementierungsmöglichkeiten von Alterungsmechanismen des Werkstoffs Beton in die beiden in der GRS eingesetzten Simulationsprogramme ANSYS Mechanical und LS-DYNA ergab zwei praktikable Ansätze. Zum einen können die durch die komplexen chemisch-physikalischen Prozesse hervorgerufenen Dehnungen extern abgeschätzt und dann als Randbedingung in der Simulation vorgeschrieben werden. Zum anderen können die Alterungsmechanismen durch den Einsatz spezialisierter Materialmodelle berücksichtigt werden. Insbesondere können die Mechanismen Kriechen und Schwinden durch eine viskoelastische Materialformulierung beschrieben werden.
- AP3: Das strukturmechanische Verhalten des VeRCoRs-Containments inklusive Kriechen und Schwinden der Betonstruktur soll ausgehend von Ergebnissen einer Literaturrecherche mit Hilfe einer viskoelastischen Materialformulierung simuliert werden. Dazu wurden die von den Organisatoren des Benchmarks bereitgestellten Messdaten hinsichtlich der klimatischen Einflussgrößen des Kriechens und Schwindens, wie Temperatur und Luftfeuchte, ausgewertet und numerisch aufgearbeitet.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die vereinfachten Berechnungen zu Kriechen und Schwinden mit dem Programm MATLAB sollen fortgeführt werden. Insbesondere sollen Berechnungen zum Kriechen und Schwinden des VeRCoRs-Containmentgebäudes durchgeführt werden. Des Weiteren soll die Auswertung der Fachliteratur hinsichtlich der Alkali-Kieselsäure-Reaktion fortgeführt werden.
- AP2: Für den Einsatz eines viskoelastischen Materialmodells sollen in einem ersten Schritt die dazugehörigen zeitabhängigen Materialparameter bestimmt und die Fachliteratur weiter ausgewertet werden.
- AP3: Es sollen die zeitabhängigen Materialparameter des viskoelastischen Materialmodells gemäß den Messdaten bestimmt und strukturmechanische Simulationen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der strukturmechanischen Simulation sollen mit den im Rahmen des VeRCoRs-Projekts an mehreren Messstellen ermittelten Dehnungen in der Betonstruktur verglichen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

2.2 Vorhaben Bereich 2 bis 5

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		Förderkennzeichen: 02 E 11193A
Vorhabensbezeichnung: Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2013 bis 31.08.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.08.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 2.881.392,00 EUR	Projektleiter: 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 am Teilbericht AP1.4.

AP2: Planungsarbeiten abgeschlossen.

AP3: Mit Proben aus dem zweiten Gesenkversuch wurde bei einer Belastung von 1 MPa auf 10 MPa eine Verringerung der effektiven Gaspermeabilität des verdichteten Salzgrus-Ton-Gemisches von 10^{-18} m^2 auf unter 10^{-20} m^2 gemessen.

Versuche zur Qualitätskontrolle des MgO-Betons C3. Die Materialparameter (Ausbreitmaß, Rohdichte, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit) der mit den aktuellen Komponenten hergestellten MgO-Beton-Proben lagen im erwarteten Bereich.

AP4: Der Bau des In-situ-Großbohrlochversuches mit dem MgO-Beton C3 ($D = 1,3 \text{ m}$, $L = 3,8 \text{ m}$) wurde erfolgreich abgeschlossen. Die neue Druckkammerkonstruktion mit eindeutig definiertem Volumen wurde durch eine Kamerabefahrung kontrolliert. Die Betonagearbeiten zum Einbau des Verschlusselementes aus MgO-Ortbeton C3 und der Einbau aller Messgeber (Temperatur, Druck, Dehnung, Feuchte) sowie von zwei Kontrollkammern für zukünftige Dichtheitstests wurden abgeschlossen.

Die Messerwerterfassung wurde mit Beginn der Betonage gestartet. Im Kern betrug die Maximaltemperatur $62 \text{ }^\circ\text{C}$, an der Kontur $38 \text{ }^\circ\text{C}$. An der Kontur beträgt der Kontaktdruck zwischen Steinsalz und MgO-Beton C3 inzwischen ca. 2 MPa und steigt weiter leicht an.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Fortschreibung der Teilberichte.

AP2: Keine weiteren Arbeiten.

AP3: Untersuchungen von Proben des MgO-Betons C3 (Rückstellproben der Betonage und Proben, die nach dem sich eingestellten Temperatur-Zeit-Verlauf des Versuches hergestellt wurden.

AP4: Auswertung der Messwerte und pneumatischer Vortest des Großbohrlochversuches zum Test eines Verschlusselementes aus MgO-Beton C3 im Steinsalz.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11193B
Vorhabensbezeichnung: Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2013 bis 31.08.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.08.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.074.607,85 EUR	Projektleiter: 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

AP4: Aus dem zweiten Gesenkversuch standen zwei Kerne für Dünnschliffuntersuchungen zur Verfügung. Aus dem ersten Kern wurden drei horizontale Schliffe entsprechend der Einbaulagen erstellt. Wie bereits beim ersten Gesenkversuch, ist eine deutliche Lagenabhängig-

keit der benetzten Bereiche zu sehen. In der oberen Lage sind großflächige Benetzungen und Bahnen, entlang derer sich das Harz ausgebreitet hat, zu erkennen. Kornrisse sind häufig 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 finden. Im vertikalen Schliff lassen sich aber keine klaren Lagenübergänge erkennen. Die Probe scheint stark genug durchgewalkt zu sein, um Schichtgrenzen zu zerstören. Vermeintliche Schichtgrenzen der einzelnen Lagen sind auch im Vertikalschliff des zweiten Kerns nicht nachweisbar. Die Orientierung der großen Partikel ist typisch, allerdings durch den Kornbruch beeinflusst. Prinzipiell liegen somit keine neuen Erkenntnisse gegenüber älteren Untersuchungen vor. Eine "Kanalbildung" ist nirgendwo zu sehen. Der untere Bereich der Probe scheint stärker verdichtet zu sein als der Obere. Insgesamt scheint die "Benetzung" höher zu sein als bei den früheren Proben. Die Verteilung der "Benetzung" ist aber lokal sehr unterschiedlich.

AP5: Im Berichtszeitraum wurde an der Verknüpfung zwischen dem partikelbasierten Code PFC3D und einer kontinuumsmechanischen Umgebung (FLAC3D) weitergearbeitet. Für den Test der Plausibilität der Ergebnisse liegt insbesondere der Kontaktbereich FLAC3D zu PFC3D im Fokus. Der Test der Plausibilität erfolgt dadurch, dass die Übertragung der Gewichtskraft der PFC3D-Schottersäule auf das FLAC3D-Modell geprüft wird. Die Dichte einer 5 m - Schottersäule wird testweise erhöht, damit diese der Gewichtskraft des abgeteufte Gebirges/Schachtes entspricht. Die Spannung muss dann der Spannung vor Abteufen des Schachtes entsprechen. Die zweite Plausibilitätsberechnung prüft, ob die dynamische Anregung am FLAC3D-Modellrand auf das PFC3D-Modell übertragen wird. Dazu wurden nur die p-Wellen des Erdbebens mit vereinfachten Randbedingungen (keine Reflektion) aufgebracht. Die Testrechnungen lieferten plausible Ergebnisse. Aufbauend darauf wurde eine 50 m Schottersäule mit dem gekoppelten Modell modelliert. Die Korngröße des Schotters wurde im Modell um den Faktor 6 vergrößert (zur Verringerung der Rechenzeit). Berechnungsergebnisse unter Erdbebenbelastung liegen auf Grund der immer noch hohen Rechenzeiten noch nicht vor.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP5: Die Arbeiten zur Simulation von Schottersäulen mit Hilfe eines partikelbasierten Codes werden weitergeführt. Als Gebirge wurde bisher Steinsalz angenommen; entsprechende Parameter für Tongestein müssen noch umgesetzt werden. Für Gebirge und Schottersäule müssen weiterhin geeignete Dämpfungsarten gewählt werden; entsprechende Parameter müssen erarbeitet werden. Das Setzungsverhalten der Schottersäule und die Spannungsumlagerungen im Schotter bei dynamischer Anregung müssen nach Beendigung der Berechnungen ausgewertet werden. Die Arbeiten zum Bitumenstoffgesetz werden weitergeführt. Die von der TU Bergakademie bereitgestellten und ausgewerteten Messergebnisse werden zur Kalibrierung des Modellansatzes genutzt.

AP6: Die Erkenntnisse der durchgeführten Dünnschliffuntersuchungen werden zu dem Teilbericht „Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben“ ergänzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11284
Vorhabensbezeichnung: Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld (BIGBEN)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 30.09.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.09.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 846.738,00 EUR	Projektleiter: 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:

Eine Überprüfung der Luftfeuchtigkeitsdaten ergab Unstimmigkeiten und machte eine Revision der gewonnen Isothermen erforderlich. Die überarbeiteten Daten lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Der angedeutete Verlauf entspricht in guter Näherung der Adsorptionsisotherme.
- Die Temperaturabhängigkeit ist offenbar aufgrund der Messunsicherheiten kaum ableitbar.
- Eine Änderung der Sorptionseigenschaften durch Aufheizen bis 90 °C und anschließende Abkühlung auf 30 °C wird nicht beobachtet.

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

Im vorangehenden Berichtszeitraum waren durch Festlegung von geeigneten Adsorptions-Desorptionszyklen die Scanlines sowohl für die Adsorption als auch für die Desorption sowohl für MX-80 als auch für Calcigel bei 25 °C aufgenommen worden. Nachfolgend stellte sich jedoch heraus, dass das Gerät bei der Messung von Calcigel nicht einwandfrei gearbeitet hat. Einer längeren Testphase zur Einkreisung des Fehlers folgte zum Jahresende ein erneutes Einschicken der Maschine.

Die konkrete Konstruktion einer Zelle für die Messungen mit kompaktiertem, eingespannten Bentonit liegt vor. Die Funktionstüchtigkeit der doch recht kleinen Klimakammer in der VSA bei eingelegter Zelle muss aber noch geprüft werden, bevor die Zelle gefertigt werden kann.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Nach Eingang, Test der VSA auf Funktionstüchtigkeit
- Test der Klimakammer in der VSA mit Hilfe eines Kunststoffdummys; Anfertigung der Messzelle
- Messung der Temperaturabhängigkeit der Isothermen für diskrete Feuchtigkeiten (MX-80 und Calcigel); Variation der Temperatur bei festeingestellter Feuchtigkeit müsste schneller sein als das Messen mehrerer Hystereseschleifen bei fester Temperatur
- Aufnahme der Arbeiten zur systematischen Quantifizierung des Einflusses einer Einspannung der Bentonitproben auf die Mikrostruktur des Bentonits und den daraus resultierenden Verlauf der Isothermen
- Herleitung geeigneter analytischer Funktionen zur Beschreibung der Scanlines
- Implementierung der neuen Isothermenfunktionen in den Code VIPER

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11294
Vorhabensbezeichnung: Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2014 bis 30.09.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 30.09.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.011.080,00 EUR	Projektleiter: 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

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

4. Geplante Weiterarbeiten

Keine, Vorhaben endete im Berichtszeitraum.

5. Berichte, Veröffentlichungen

P. Herold, N. Bertrams, E. Simo, W. Bollingerfehr, S. Prignitz, W. Filbert, C. Friedrich (BGE): Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Salzformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-07, Peine

P. Herold, N. Bertrams, E. Simo, S. Prignitz: Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante vertikale Bohrlochlagerung in Tongesteinsformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-08, Peine

P. Herold, S. Prignitz, N. Bertrams, E. Kuate Simo, W. Bollingerfehr, W. Filbert, C. Friedrich (BGE), A. Becker (SIEMAG TECBERG): Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Salzformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-09, Peine

P. Herold, N. Bertrams, E. Simo, S. Prignitz: Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Tongesteinsformationen, Technischer Bericht, BGE TEC 2018-10, Peine

P. Herold, S. Prignitz, E. Simo, W. Filbert, N. Bertrams, W. Bollingerfehr: Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen, Abschlussbericht, BGE TEC 2018-11, Peine

P. Herold, S. Prignitz, E. Simo, W. Bollingerfehr: Retrievability in German SF/HLW Repository Concepts - Technical Solutions and Provisions for Implementation, Poster, 8th IGD-TP Exchange Forum, Berlin, December 2018

P. Herold: Knowledge and Experience on Retrievability of SF/HLW Waste Packages, Vortrag, 8th IGD-TP Exchange Forum, Berlin, December 2018

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11304
Vorhabensbezeichnung: Tonforschung im Untertagelabor Mont-Terri	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.560.517,33 EUR	Projektleiter: 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 Streckenlagerungsexperiment der NAGRA im 1:1 Maßstab
- AP2: HE-E Experiment – Weiterführung des im Rahmen des EU-Projekts PEBS aufgebauten Erhitzerversuchs im Mikrotunnel (mit NAGRA, ENRESA 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 Erweiterung des dreidimensionalen Finite-Element-Modells des FE Experiments um die Tunnelauffahrung ist aufwändiger als angenommen, daher liegen noch keine neuen Modellierungsergebnisse vor.
- AP2: Der HE-E Versuch wurde störungsfrei weitergeführt. Der Buffer im zentralen und erhitzenahen Bereich ist immer noch entsättigt, und der tunnelnahe Gebirgsbereich steht noch unter Saugspannung.
- AP3: Seit 2009 werden mit einer in einem horizontalen Bohrloch eingebauten Dilatometersonde die Langzeitverformung des Bohrlochquerschnitts sowie ergänzend Temperatur und Luftfeuchte gemessen. Die bisher gemessene stetige, nahezu stationäre Bohrlochkonvergenz hat sich seit März 2018 zumindest vorübergehend beschleunigt.
- AP4 und AP5 sind abgeschlossen.
- AP6: Zur Bestimmung der Festigkeit der sandigen Fazies des Opalinustons wurden triaxiale Kompressions- und Extensionsversuche an 30 Proben durchgeführt. Zur Bestimmung der langzeitigen Verformungen von unterschiedlichen Tonsteinen sind Triaxialkriechversuche mit 5 Proben der sandigen und karbonatreichen Fazies der OPA-Tonformation und der oberen karbonatreichen COX-Tonformation bei unterschiedlichen Beanspruchungen in Betrieb. Verheilungsversuche mit drei künstlich geschädigten Proben des sandigen Opalinustons werden zurzeit durchgeführt, wobei die Wasserdurchlässigkeit jeder Probe als ein wichtiger Parameter bei erhöhter Druckspannung gemessen wird.
- AP7: VIRTUS wurde um verbesserte Werkzeuge zur Erstellung von Modellausschnitten erweitert. Die neue Version wurde zur Erzeugung eines realistischen 3D-Modells der Sandwich-Nische und ihrer Umgebung einschließlich Gallery 08 eingesetzt.
- AP8: Im September 2018 wurde die letzte der fünf geplanten Minipiezometer-Bohrungen durchgeführt, und die Instrumentierungsarbeiten wurden abgeschlossen. Die seither erfassten Messdaten zeigen allerdings, dass eine Nachinstrumentierung erforderlich ist.
- AP9: Teilnahme am Steering Meeting im November 2018.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Weiterführung der Messungen in den laufenden Experimenten
- THM-Simulation der Aufheizphase im FE Experiment (unter Einsatz von VIRTUS)
- Modellierung der Bohrlochverformung in DM-A mit viskosen Ansätzen
- Fortführung der laufenden Langzeitkriechversuche und Verheilungsversuche
- Nachinstrumentierung im Mine-By Experiment
- Abschlussbericht

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11314
Vorhabensbezeichnung: Ermittlung der Stabilitätsbandbreiten redoxdeterminierender eisenhaltiger Korrosionsphasen (KORPHA)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.05.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 666.350,00 EUR	Projektleiter: 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

Im Mittelpunkt der Arbeiten stand eine vertiefte Prüfung der Frage, mit welchen Randbedingungen in einem Endlager in einer norddeutschen Unterkreideton-Formation zu rechnen ist. Es wurde deutlich, dass zwischen dem Tonstein und den begleitenden Sandsteinen streng unterschieden werden muss. Während in tiefen Sand- oder Kalksteinformationen mit salinaren, teilweise hochsalinaren Lösungen zu rechnen ist, können in tiefen Tonformationen auch schwach mineralisierten Wässern auftreten. Sie werden durch Austreiben von Ionen während der lang andauernden Kompaktion hervorgerufen. In diesen Fällen können die Salinitäten in den Tonporenwässern um einen Faktor 10 bis 20 kleiner ausfallen als in den begleitenden Sandsteinen. Die Konzentrationen unterschreiten dann sogar die Werte für Meerwasser, aus dem heraus die Tone abgelagert wurden.

Die Richtung der Salinitätsentwicklung hängt vom vorherrschenden Tonmineraltyp ab (Kaolinit oder Smektit). Dies zeigten sowohl Analysen an natürlichen marinen Tonproben als auch Untersuchungen von im Labor kompaktierten Ton/ Meerwasser-Schlamm. Es konnten mittlerweile auch einige chemische Analysen an norddeutschen Tonproben ausfindig gemacht werden, die diese Aussagen unterstützen.

Für ein Endlager im Ton sind also je nach Standort zwei Lösungsszenarien zu unterscheiden. Langsame Aufsättigung des Backfills mit schwach salinaren oder hochsalinaren Tonporenwasser (normale Entwicklung) oder Zutritt einer begrenzten Menge hochsalinaren Wassers aus einem unentdeckten Sandsteinreservoir, das nach Verschluss des Einlagerungsbereichs aktiviert wird. Anschließend kann eine Korrosion der Außen- und Innenliner und dann der Behälter stattfinden. Für beide Fälle wurden Abschätzungen für die initiale Lösungszusammensetzung wie auch die Entwicklung des Redoxniveaus, des pH-Wertes und des Wasserstoffdrucks vorgenommen.

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.

Abschätzung der Auswirkung des erwarteten Redoxniveaus auf die Löslichkeit ausgewählter Radionuklide und Modellierung der Ausbreitung im Endlagergebäude.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11334A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 30.11.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 30.11.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 922.218,00 EUR	Projektleiter: 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

Überarbeitung und Validierung des theoretischen Modells zur Auswertung der experimentellen Impedanz-Daten der experimentellen Impedanz-Messungen (AP3)

Das Modell zur Auswertung der Impedanz-Messdaten, das von der Lösung der Transportgleichung für zwei mobile Ionen abgeleitet wurde, beinhaltet eine Elektrolyt-Kapazität. Diese entspricht einer Niederfrequenzkapazität im semiempirischen Ersatzschaltbild, das verwendet wird, um die experimentellen Impedanzdaten anzupassen. Die Umsetzbarkeit dieses Modells wurde für verschiedenen Lösungskonzentrationen überprüft. Dabei wurden andere elektrochemische Effekte entdeckt, die vorher übersehen wurden und deren Berücksichtigung zur

Einführung eines Korrekturverfahrens geführt haben. Eine Routine zur Auswertung der experimentellen Spektren wurde entwickelt:

- Messung der Impedanzspektren in einem Frequenzbereich $0.01 - 10^6$ Hz
- Anpassung des Niederfrequenzbereichs zu dem Ersatzschaltbild, das den Elektrolytwiderstand und zwei in Serie geschalteten parallelen RC-Elemente beinhaltet, die der Ionenakkumulation bzw. der Doppelschicht entsprechen.
- Eingabe des Elektrolytwiderstands und der Elektrolytkapazität in das theoretische Modell zur Berechnung der Überführungszahl.

4. Geplante Weiterarbeiten

Erstellung des Abschlussberichtes.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11334B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2014 bis 31.07.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 259.275,00 EUR	Projektleiter: 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, Karlsruher 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.
- Infrarotspektroskopische Untersuchung der U(IV)-Sulfatkomplexierung inklusive Vergleichsmessungen für Thorium(IV)
- Durchführung von U(IV)-Speziationsuntersuchungen in pH-Wertbereich von 0 bis 2 zu Identifizierung der ersten U(IV)-Hydrolysespezies
- Spektroskopische und thermodynamische Charakterisierung der identifizierten UOH^{3+} Spezies unter Berücksichtigung des Einflusses von Temperatur und Ionenstärke
- Untersuchung des Einflusses von tiefen Temperaturen auf die Fluoreszenzeigenschaften des freien Uranyl(VI) Ions in Kombination mit UV/Vis Messungen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3.2:

- Einreichung der Publikation zum Einfluss von Sulfat auf die U(IV)-Speziation.
- 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
- Spektroskopische Bestimmung der Uran(IV, VI) Speziation in endlagerrelevanten Gruben- und Porenwässern

AP3.4:

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Lehmann, S.; Steudtner, R.; Gerber, U.; Zimmermann, T.; Brendler, V.: Speciation of U(IV) sulfate in aqueous solution – spectroscopic characterization and thermodynamic modelling; East German Centre of Competence in Nuclear Technology, Workshop of Doctoral Candidates (PhD student seminar), December 13, 2018, Zittau, Germany (2018).

Steudtner, R.; Drobot, B.; Zabelt, D.; Bader, M.; Hilpmann, S.; Großmann, K.: Luminescence spectroscopy of uranium in environmental systems; 8. RCA-Workshop, June 12 – 14, 2018, Dresden, Germany

Steudtner, R.; Hilpmann, S.; Bader, M.; Jessat, J.; Sachs, S.; Cherkouk, A.: Mechanistic understanding for biochemical and biological processes of uranium(VI) by time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy (TRLFS); 4th International Workshop on Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy (ATAS), November 06 – 09, 2018, Nice, France (2018).

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11344A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2015 bis 28.02.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 858.857,00 EUR	Projektleiter: 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 20 Quelldruck- und Permeabilitätsversuche mit den bei 90 °C reagierten Proben in der letzten Messkampagne gestartet. Der Abschluss der Versuche ist zum Projektabschluss im nächsten Halbjahr geplant.

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 wurden abgeschlossen.

Die Karbonatbombe-Messungen der Karbonatgehalte wurden abgeschlossen.

Zwei letzte Messreihen zur Aufklärung der Mechanismen der Gasfreisetzung in Bentoniten bei 90 °C wurden beendet und die Gasanalysen durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Die Quelldruck- und Permeabilitätsmessungen der bei 90 °C zwei Jahre reagierten Bentonite werden fortgesetzt.
- Erstellung des Abschlussberichtes.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11344B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2015 bis 31.12.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 300.296,00 EUR	Projektleiter: 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; 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 wurde die Entwicklung der mikrobiellen Diversität in den Bentoniten B36 und SD80 in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (Porenlösung, Temperatur, Anwesenheit von Substraten) analysiert. Die Bentonite wurden hierfür bei der GRS in Braunschweig mit Opalinuston-Porenlösung bzw. verdünnter Gipshut-Lösung versetzt. Zu den mikrobiellen Ansätzen wurden zusätzlich Substrate gegeben (50 mM Laktat, 50 mM Azetat, 1 mM Methanol und 0,1 mM AQDS). Die insgesamt 48 Ansätze inkubierten in gasdichten Glasflaschen bei 25 °C, 60 °C und 90 °C für jeweils ein und zwei Jahre.

Von allen 48 Ansätzen konnte die DNA erfolgreich isoliert werden. Die Amplifikation der 16S rDNA sowie die abschließende Sequenzierung konnte bisher für 10 Proben erfolgreich durchgeführt werden (8 Ansätze und die zwei Ausgangs-Bentonite). Im Allgemeinen konnte hier festgestellt werden, dass sich die mikrobielle Zusammensetzung in den bisher analysierten Ansätzen deutlich von der Zusammensetzung der jeweiligen Ausgangsmaterialien unterscheidet. Je nach Bentonit und verwendeter Porenlösung verändert sich die mikrobielle Diversität.

- Temperatur: Von den 8 analysierten Ansätzen inkubierten 7 bei 25 °C – ein Hinweis darauf, dass mesophile Mikroorganismen in den zwei analysierten Bentoniten nach ein bis zwei Jahren Inkubation anwesend sind, sich vermehren und in Folge dessen auch metabolisch aktiv sind. Der noch verbliebene analysierte Ansatz inkubierte bei 60 °C. Drei Ansätze bei 90 °C (B36 Gips, B36-OPA, SD80-OPA; jeweils ohne Substrat) werden momentan sequenziert.
- Porenlösung: Bezüglich Bentonit SD80, stellt die Zugabe von synthetischer Opalinuston-Porenlösung einen deutlichen Selektionsvorteil für die dort vorhandenen Mikroorganismen dar. Die Zugabe von Substraten wirkte sich zusätzlich positiv auf das mikrobielle Wachstum aus. Aus den SD80-Ansätzen, welchen verdünnte Gipshutlösung zugesetzt worden war, konnte bisher keine Probe erfolgreich sequenziert werden, unabhängig von der An- bzw. Abwesenheit von Substraten. Aus den B36-Ansätzen konnte dagegen auch DNA isoliert werden, wenn verdünnte Gipshutlösung zugesetzt worden war, wieder unabhängig von der An- bzw. Abwesenheit von Substraten.
- Mikrobielle Diversität: Die Ausgangsmaterialien der beiden Bentonite unterscheiden sich bereits sehr deutlich in ihrer intrinsischen mikrobiellen Diversität. Je nach Bentonit und gewählter Bedingung (Temperatur, Porenlösung, Anwesenheit von Substraten) verändert sich diese Diversität außerdem sehr deutlich. Generell konnten in beiden Bentoniten sehr oft Mikroorganismen identifiziert werden, welche in der Lage sind Sporen zu bilden. Diese Überdauerungsformen ermöglichen es den entsprechenden Mikroorganismen unter harschen Bedingungen zu überleben. In den SD80-Ansätzen, welche mit Opalinuston-Porenlösung (mit Substrat) versetzt wurden und bei 25° C inkubierten, konnte eine deutliche Dominanz von sporenbildenden und Sulfat-reduzierenden Mikroorganismen der Gattungen *Desulfosporosinus*, *Desulfitobacterium* und *Desulfotomaculum* nachgewiesen werden. 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. Im Bentonit B36 konnten Mikroorganismen der Gattungen *Streptomyces* und *Bacillus* nachgewiesen werden. Diese Gattungen können ebenfalls Sporen bilden und sind metabolisch sehr divers.

4. Geplante Weiterarbeiten

Verfassen des Abschlussberichtes.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Die mikrobiellen Ergebnisse des UMB-Projektes wurden im Rahmen eines Abteilungs-Seminars am Institut für Ressourcenökologie vorgestellt.

Zuwendungsempfänger: Universität Greifswald, Domstr. 11, 17489 Greifswald		Förderkennzeichen: 02 E 11344C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2015 bis 31.12.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 198.054,00 EUR	Projektleiter: 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

Zur Erfassung der Alterationsmechanismen wurde die chemische Zusammensetzung der Smektite mittels Elementkartierung (EDX) am FIB-SEM bestimmt. Über die Berechnung der Strukturformeln wurden sowohl die Gesamtschichtladung als auch die Ladung von Tetraeder- und Oktaederschicht bestimmt. Das Vorliegen der reinen Smektitfraktion ist die wichtigste Voraussetzung, um den Einfluss akzessorischer Minerale auszuschließen. Die Abtrennung der Smektitfraktion erfolgte durch einen wiederholten Zyklus aus Dispergieren durch Ultraschall und Zentrifugation. Im Anschluss wurden zunächst orientierte Präparate hergestellt, um den Reinheitsgrad mittels XRD zu überprüfen. Im An-

schluss wurde die gewonnene Suspension für die Elementkartierung auf polierte Spektralkohle präpariert. Vor jeder EDX Messung erfolgte der Abgleich an Standardmineralen.

Die vollständige Abtrennung der reinen Smektitfraktion war nicht für alle Proben erfolgreich. Insbesondere die Proben B09 und B31 enthalten feinkörnigen Cristobalit, eingebettet in der Matrix des Smektit. Eine Analyse an diesen Proben war somit nicht möglich. Des Weiteren enthalten die Proben B13, B16, B36 und B38 akzessorische Minerale wie Glimmer, Kaolinit und Calcit. Dies ist bei der Auswertung der Daten zu berücksichtigen. Bei den restlichen neun Proben konnte Smektit erfolgreich abgetrennt und die Elementanalysen durchgeführt werden. Unter der Annahme, dass hohe Temperaturen Alterationsprozesse katalysieren, werden im Folgenden lediglich die Ausgangsmaterialien mit den Reaktionsprodukten bei $T = 120\text{ °C}$ (1 Jahr, Gipshuttlösung) verglichen. Röntgendiffraktometrisch (XRD) wurden keine Änderungen, wie z. B. Mineralneubildung in den Bentoniten erfasst. Mittels EDX Analyse wurden jedoch Änderungen der chemischen Zusammensetzung der Smektite und ihrer Schichtladung bestimmt. Bei den Alterationsmechanismen handelt es sich um Auflösungs- und Austauschreaktionen, wie zum Beispiel der Austausch von Al^{3+} durch $\text{Fe}^{2+/3+}$ und Mg^{2+} im Oktaeder und von Si^{4+} durch Al^{3+} im Tetraeder.

Die Reaktion der Bentonite bei 120 °C in verdünnter Gipshuttlösung für 1 Jahr resultiert für die meisten Proben in der Alteration der Tetraederschichtladung hin zu negativen Werten. Die Bentonite B16, B36 und SD80 zeigen die stärkste Änderung der Schichtladung. B13, B19, B37, B38 und B49 zeigen lediglich minimale Änderungen, wobei die Proben B11 und B23 keine Änderungen zeigen. Bei den beiden nicht alterierten Bentoniten handelt es sich um Na-Smektite.

An ausgewählten Bentoniten (B16, B19, B36, B37 und SD80) wurde zudem die Schichtladung mittels O-D Methode unter Verwendung der ATR-Infrarotspektroskopie bestimmt. Nach Abtrennung der $<2\text{ }\mu\text{m}$ Fraktion und Kationenbelegung (Ca^{2+}) wurden die Proben mit D_2O gesättigt und die Lage der O-D Absorptionsbande bestimmt, welche mit der zu bestimmenden Schichtladung korreliert. Die Messungen erfolgten am Institut für geologische Wissenschaften im Forschungszentrum Krakau (Polen). Die Proben B16, B19 und B37 zeigen nahezu keine Änderung der Gesamtschichtladung nach den Experimenten. Die Proben B36 und SD80 zeigen hingegen Änderungen der Schichtladung von bis zu 0,04 Ladungen pro halber Einheitszelle.

Der Bentonit SD80 wurde außerdem für 3-monatige In-situ-XRD-Hydratationsexperimente in Durchflusszellen genutzt. Zudem wurden die restlichen tonmineralogischen Analysen (XRD, XRF) der 2-Jahresreaktionsreihe abgeschlossen. Mit Abschluss des UMB I Projektes steht eine umfangreiche Datenbank der ausgewählten Bentonite zur Verfügung.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nach Bestimmung der Alterationsmechanismen bleibt, aufgrund der Komplexität der Experimente, jedoch offen wie bzw. wodurch diese kontrolliert werden. Gezielte Experimente an synthetischen Mischungen mit reinem Smektit sollen aufklären, welchen direkten Einfluss akzessorische Minerale, Partikelgröße und Lösungsschemismus auf die Umwandlungsmechanismen von Smektiten haben.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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. 9th Mid-European Clay Conference in Zagreb, Kroatien, Poster

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

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München	Förderkennzeichen: 02 E 11344D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt D	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2015 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 229.490,00 EUR	Projektleiter: 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

AP V2: Fe(II)-Substitutionen in Smektiten

Untersuchungen zu oktaedrischen Fe(II)-Substitutionen in exemplarischen Smektitmodellen (AP V2) wurden für Pyrophyllit fortgesetzt und auf Beidellit mit der Schichtladung $-0.25 e$ als Beispiel eines geladenen Smektit erweitert.

Für transvakanten Pyrophyllit wurden verschiedene relative Anordnungen zweier oktaedrischer Fe-Substitutionen betrachtet. Während benachbarte Positionen für Fe(III) nur um 6 kJ/mol ungünstiger sind als entfernte, steigt dieser Wert für das Paar Fe(II)/Fe(III) auf 24 kJ/mol und für Fe(II)/Fe(II) aufgrund der Abstoßung der Ionen auf 54 kJ/mol. Dies deutet an, dass Konzentrationen von oktaedrischen Fe-Substitutionen bei Reduktion zu Strukturänderungen in Smektiten führen können. Die Reduktion von Fe(III) macht sich mit steigendem Ei-

sengehalt im Gitter durch einen wachsenden Gittervektor c bemerkbar, also Folge des Einbaus kompensierender Na-Ionen. Für eine Fe-Substitution in der $2 \times 1 \times 1$ -Einheitszelle beträgt der Anstieg etwa 5 pm und wächst auf bis zu 14 pm für vier reduzierte Fe-Substitutionen. Die beiden anderen Gittervektoren zeigen für eine Substitution einen Anstieg um bis zu 7 pm, der mit wachsendem Fe-Gehalt zurückgeht. Um das Redoxpotential von oktaedrischen Fe-Substitutionen abzuschätzen, wurde von der Referenz des solvatisierten Na^+ und einem Elektron ausgegangen. Die Gesamtenergie des solvatisierten Na^+ -Ions wurde ausgehend von einem berechneten Na-Atom in der Gasphase über das bekannte Ionisierungspotential und die Hydratationsenergie abgeschätzt. Dies erschien nach Vergleich verschiedener Vorgehensweisen am vertrauenswürdigsten. Mit wachsender Zahl der Fe-Substitutionen wurden Variationen des mittleren Redoxpotentials von bis zu 0.25 V in Abhängigkeit vom Eisengehalt und der relativen Anordnung der Fe-Substitutionen erhalten. Für eine einzelne Fe-Substitution wurde die Abhängigkeit des Redoxpotentials von der Art des Gegenions untersucht. Für ein wasserfreies Mineralmodell wurde ein steigendes Redoxpotential entlang der Alkali-Reihe erhalten. Für gleich hydratisierte Alkaliionen in der Zwischenschicht ergab sich erwartungsgemäß ein nahezu konstantes Potential der Fe(III)-Reduktion.

Für ein beidellitisches transvakantes Smektitmodell wurde der Einbau von ein und exemplarisch auch zwei Fe(II)-Substitutionen sowie die entsprechende Reduktion von Fe(III) betrachtet. Der Einfluss der Fe(III)-Reduktion auf das Kristallgitter ist mit Pyrophyllit vergleichbar. Er beträgt für den Gittervektor c maximal 8 pm und ist für Beidellit stärker vom Substitutionsplatz abhängig. Während Fe(III)-Substitutionen in Beidellit nahe einer tetraedrischen Substitution günstiger sind, ist eine Fe(II)-Substitution fern der tetraedrischen Substitution wegen der elektrostatischen Abstoßung der Substitutionen bevorzugt. Die Energieunterschiede zwischen verschiedenen Plätzen sind hierbei für Fe(II) deutlich ausgeprägter. Weiterhin werden diese relativen Energien auch von der Verteilung der Zwischenschichtionen beeinflusst, was für Fe(III) nur in geringem Maße der Fall ist. Plätze mit nah benachbarten Zwischenschichtionen sind dabei bevorzugt, Plätze nahe einer tetraedrischen Substitution jedoch in jedem Falle ungünstig. Für Beidellit wurden geringfügig niedrigere Redoxpotentiale für Fe(II) an günstigen Plätzen im Vergleich mit Pyrophyllit berechnet. Andere Plätze ergeben bis zu 0.25 V niedrigere Potentiale, auch für Smektitmodelle mit solvatisierten Zwischenschichtionen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP V1: Fe(III) in Ca-Smektiten: Effekt Solvation Zwischenschichtionen

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

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe		Förderkennzeichen: 02 E 11355
Vorhabensbezeichnung: Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2015 bis 31.08.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.08.2018	
Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 307.607,00 EUR	Projektleiter: 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 Juli und August 2018 wurden letzte Experimente durchgeführt sowie die Auswertung aller Arbeitspakete vorangetrieben.

4. Geplante Weiterarbeiten

Beendigung des Projekts und Fertigstellung des Schlussberichts.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Schmidt, H-M., Finantz, P., Wiens, M., Schultmann, F. (2017): WoPEE: A Web-oriented Platform for Economic Experiments. Presentation at the Jahrestagung der Gesellschaft für Experimentelle Wirtschaftsforschung, Kassel.

Schmidt, H-M., Wiens, M., Schultmann, F. (2017): The Search for a Final Repository in Germany: Results of a Series of Stakeholder Interviews and Economic Experiments. Presentation at the ENTRIA Final Conference 2017, Braunschweig.

Schmidt, H-M., Schindler, M., Wiens, M., Schultmann, F. (2017): Stakeholders' Perceptions of Goals and their Claims towards a new Approach. Presentation at the ENTRIA Final Conference 2017, Braunschweig.

Weitere Publikationen aktuell in Arbeit.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11365
Vorhabensbezeichnung: Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2015 bis 31.05.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 827.281,00 EUR	Projektleiter: 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

Auf Basis publizierter Lösungsanalysen (5800) aus einer großen Zahl von deutschen Salzbergwerken wurde die Bandbreite der potentiell auftretenden, an mehreren Salzmineralen gesättigten Lösungen charakterisiert. Insgesamt wurden 5 Typgruppen mit 9 Untergruppen beschrieben. Für jede Untergruppe wurde eine Lösung mit diskreter Lösungszusammensetzung benannt, die als typisch für die gesamte Gruppe gelten kann. Sie dienen als Basis für spätere Modellierungen der Radionuklidlöslichkeiten.

Innerhalb des Untersuchungsprogramms zur Bestimmung der Löslichkeit von Radionukliden in Salzlösungen bei verschiedenen pH-Werten wurden die Versuchsreihen mit verschiedenen Lösungstypen unter aeroben Bedingungen zunächst abgeschlossen.

Die Lösungszusammensetzungen des umfangreichen Untersuchungsprogramms werden zurzeit im GRS-Labor analysiert. Nach der Auswertung der Analyseergebnisse können diese Versuche endgültig abgeschlossen werden, wobei abschließend noch Proben der resultierenden Bodenkörper genommen und charakterisiert werden.

Für den Ansatz von integralen Langzeitversuchen an ausgewählten Systemen, bei denen die Spaltelementkorrosion während fortlaufender Eisenkorrosion und unter Wasserstoffdruck bestimmt wird, wurden zunächst Reaktionsbehälter beschafft und deren Dichtigkeit mit N₂- und H₂-Gas bestimmt. Nach erfolgter Erprobung können die integralen Langzeitversuche angesetzt werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Fortsetzung der Versuche zur Bestimmung der Löslichkeit von Spaltelementen in ausgewählten salinaren Lösungen (IP9, Unterkreide, halitgesättigte Lösung) unter anaeroben, CO₂-freien Bedingungen. Hierfür sind die folgenden Radionuklide vorgesehen: Mo(IV), Pd(II), Se(-II,0,IV), Sm, Sn(II), Zr. Weitere Löslichkeitsversuche, auch unter aeroben Bedingungen sind für IP21-Lösung vorgesehen.

Des Weiteren werden für ausgewählte Systeme integrale Langzeitversuche angesetzt, bei denen die Spaltelementkorrosion während fortlaufender Eisenkorrosion und unter Wasserstoffdruck bestimmt wird.

Fortsetzung der Untersuchung von Analogien und Korrelationen für ausgewählte Wechselwirkungen zwischen Spaltelement-Spezies und Hintergrundspezies.

Ableitung von Löslichkeitsgrenzen in den Lösungen IP9, Unterkreide und halitgesättigte Lösung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11385
Vorhabensbezeichnung: Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.4		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2015 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 549.185,00 EUR	Projektleiter: 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 wurde die Option vertikale Bohrlochlagerung verwendet.

Für das damit verbundene Design der Einlagerungsfelder und das Verfüll- und Verschlusskonzept wurde ein Entwurf für ein Monitoring-Konzept erarbeitet. Dieses Monitoring-Konzept ist speziell auf das geotechnische Barrierensystem abgestimmt, um dessen zeitliche Entwicklung messtechnisch zu beobachten.

Parallel dazu wurde erarbeitet, in welcher Form Entscheidungsprozesse im Zuge der Endlagerentwicklung während der Betriebsphase mit Ergebnissen eines Endlager-Monitorings verknüpft sein können. Es wurden Ablaufdiagramme erstellt, die diese Verknüpfungen anschaulich aufzeigen. Darüber hinaus wurden Reaktionsoptionen aufgelistet, für den Fall, dass Monitoring-Ergebnisse Abweichungen von der erwarteten Entwicklung der beobachteten Endlagerkomponente anzeigen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Beschreibung des entwickelten Monitoring-Konzeptes und der zugehörigen Entscheidungsprozesse in Berichtsform.
- Diskussion der Projektergebnisse im Zusammenhang mit den Arbeiten im Rahmen des Europäischen Verbundprojektes MODERN2020 auf der Abschlusskonferenz im April 2019 in Paris.
- Auswertung der Diskussionsergebnisse aus der Abschlusskonferenz und Integration in die Themenbereiche des Abschlussberichtes.
- Dokumentation der Projektergebnisse in einem Abschlussbericht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstr. 21, 55122 Mainz	Förderkennzeichen: 02 E 11415A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 663.720,00 EUR	Projektleiter: 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-Zentrums 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

Mittels Batch-Versuchen wurde die Sorption von 1 µM U(VI) und 0,01 µM Np(VI) an Zementsteinpulver (HCP mit w/z = 0,5) in verdünnter Gips-Lösung (VGL) unter Ar-Atm. untersucht. Für U(VI) zeigte die pH-Reihe (pH 9 – 13, 72 h) mit S/L = 1 g/L eine Abnahme der Sorption und der Verteilungskoeffizienten ($R_d = 2 \times 10^5 - 4 \times 10^3$ L/kg) bei hohen pH-Werten (ab pH 11,5). Die Kinetikreihe (pH 11,9, 5 min – 28 d, S/L = 1 g/L) zeigte einen schnellen Anstieg der Sorption (nach 1 h bei >90 %). Analog zu U(VI) zeigt die pH-Reihe mit Np(VI) eine abnehmende Sorption ab pH 11 ($R_d = 8 \times 10^4 - 3 \times 10^3$ L/kg). Eine S/L-Reihe (S/L = 0,5 – 20 g/L; pH 12,4) zeigte

quantitative Sorption ab $S/L = 5 \text{ g/L}$ mit $R_d = 1 \times 10^4 \text{ L/kg}$. Zur Stabilisierung des Np(VI) wurde 5 mM NaClO zugegeben.

Zur Charakterisierung von HCP ($w/z = 0,5$; $\varnothing < 63 \mu\text{m}$) und C-S-H (C:S 0,75; 1,07; 1,65) wurden die spezifischen Oberflächen mittels N_2 -BET ($9,9 \text{ m}^2/\text{g}$ (HCP) und $13,5 - 115,7 \text{ m}^2/\text{g}$ (C-S-H)) und die Kationenaustauschkapazität (CEC) mittels Batch-Versuchen ($S/L = 67 \text{ g/L}$, $c(\text{Na}_{\text{gesamt}}) = 0,3 \text{ mol/L}$) mit einem ^{22}Na -Tracer in MilliQ bestimmt ($0,05 \text{ mol/kg}$ (HCP) und $0,55 - 2,61 \text{ mol/kg}$ (C-S-H)). Die berechneten Werte für die Dichte der Sorptionsplätze (S_d) sind: $S_d(\text{HCP}) = 2 \text{ nm}^{-2}$ und $S_d(\text{C-S-H}) = 11 - 62 \text{ nm}^{-2}$.

An der Swiss Light Source wurde die Sorption von $20 \mu\text{M } ^{242}\text{Pu(III)}$ an einem Zementdünnchliff in Zementporenwasser ($\text{pH } 13,2$, Ar-Atm.) orts aufgelöst untersucht. Dabei konnte die Elementverteilung von z. B. Ca, Ti, Fe, Zn, Sr und des sorbierenden Pu am Dünnchliff mittels μ -XRF bestimmt werden. Weiterhin wurden mittels μ -XRD und einer Strukturanalyse die kristallinen Hauptphasen des Zements (Portlandit, Calcit, Brownmillerit, Hydrotalcit) sowie Rückstände von Alit identifiziert. Eine Korrelation zwischen sorbiertem Pu und den kristallinen Phasen konnte nicht festgestellt werden.

Ein weiterentwickelter filterfreier Aufbau für die Diffusion von Cs^+ in Opalinuston (OPA) ($\varnothing \approx 6 \text{ mm}$; $h \approx 10 \text{ mm}$) wurde mit vier Proben über einen Zeitraum von 12, 20, 32 bzw. 40 d getestet. Die Analyse und Auswertung sind in Bearbeitung. Die Diffusion mit $8 \mu\text{M } ^{99}\text{TcO}_4^-$ in Ca-Bentonit (Ca-B) (2x getrocknet; 2x unbehandelt) bei $26 \text{ }^\circ\text{C}$ in VGL bei ca. $\text{pH } 8,3$ unter Ar-Atm. wurden abgeschlossen. Die mittels HTO-Diffusion bestimmten Porositäten des Ca-B betragen $0,40 - 0,47$. Die dabei ermittelten Diffusionsparameter für Tc in Ca-B (getrocknet) betragen $D_e = (1,2 - 1,6 \pm 0,1) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und $\alpha \approx 0,10 - 0,16 \pm 0,01$. Für den unbehandelten Ca-B wurden für Tc $D_e = (1,0 - 1,2 \pm 0,1) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ und $\alpha = 0,20 - 0,22 \pm 0,01$ erhalten.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Abschluss der Batch-Versuche zur Sorption von Actiniden an C-S-H-Phasen in MilliQ und VGL
- Untersuchung des Einflusses von Gluconat auf die Sorption von Pu(III) an HCP
- Abschluss der Diffusionsexperimente mit Tc(VII) in kompaktiertem Ca-B und Experimente mit OPA in VGL; Auswertung der Diffusionsdaten von Cs^+ in OPA
- Erste Experimenten zur Diffusion von Np, Pu und Tc in HCP (filterfreie Diffusionszelle)

5. Berichte, Veröffentlichungen

V. Häußler, S. Amayri, A. Beck, T. Platte, T. Stern, T. Vitova, T. Reich: Uptake of actinides by calcium silicate hydrate (C-S-H) phases, *Appl. Geochem.* 98 (2018) 426–434.

C.-Ch. B. Meyer: Rückhaltung von Plutonium an Zementalterationsphasen, Einfluss von Gluconat auf das Sorptionsverhalten von Plutonium im Zementssystem, 2018, Diplomarbeit.

D. Hagenlocher: Untersuchung der Sorption von Plutonium(III) an Zementstein mittels Synchrotronstrahlung, 2018, Diplomarbeit.

S. Zeisel: Diffusion von Neptunium und Cäsium in Tongestein, 2018, Diplomarbeit.

G. Köhn: Experimente zur Sorption von Uran(VI) an Zementstein in verdünnter Gipshuttlösung, 2018, Masterarbeit.

A. Rudolph: Sorption von Neptunium(VI) an Zementstein, 2018, Bachelorarbeit.

E. Kranz: Synthese von Calcium-Silicat-Hydrat-Phasen und deren Charakterisierung mittels XPS, 2018, Bachelorarbeit.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11415B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 935.093,00 EUR	Projektleiter: 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 ¹⁴C-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 den Einfluss von Al-haltigen Zementzuschlagstoffen auf das bereits untersuchte U(VI)/C-S-H-System zu untersuchen, wurden Al-haltige U(VI)-dotierte C-S-H-Phasen mit einem Ca/Si-Verhältnis von 1,0, einem Al/(Al+Si)-Verhältnis von 0,05 bis 0,2 und einer U(VI)-Beladung von 30 ppm in einem Hydrothermalsyntheseverfahren hergestellt. Die U(VI)/C-A-S-H-Phasen wurden mittels PXRD, Raman, ²⁷Al-NMR, TGA, DSC und TRLFS charakterisiert. Es wurde festgestellt, dass die hohen Temperaturen der Hydrothermalsynthese die Bildung von kristallinem Al-haltigen Tobermorit fördern. Der Uran(VI)-Einbau in diese Phase wurde mittels TRLFS nachgewiesen. Mittels ²⁹Si-NMR soll nun der Einfluss des Al auf die Änderung der durchschnittlichen Silikat-Kettenlänge und des Schichtabstandes der Tobermorit-Struktur mit den beobachteten Änderungen der U(VI)-TRLFS-Spektren korreliert werden.

Mit Hilfe der site-selektiven TRLFS wurden bei pH 11 zwei U(VI)-Sorptionskomplexe auf der Ca-Bentonit-Oberfläche identifiziert. Uran-Ausfällung konnte aufgrund des beobachteten „line narrowing“ ausgeschlossen werden. Die Abstände der Emissionsbanden geben zusätzlich Aufschluss über die Struktur der Sorptionskomplexe und die Stärke der Oberflächenanbindung. Die Ergebnisse lassen auf einen außer- und einen innersphärischen Sorptionskomplex schließen.

Vor dem Hintergrund einer möglichen Mobilisierung von Radionukliden durch Anwesenheit endlagerrelevanter Organika, wurde der Einfluss von Isosaccharinsäure (ISA) auf die U(VI)-Sorptionskomplexe an Ca-Bentonit im pH-Bereich 8-13 untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Verringerung der Sorption ab einem ISA/U(VI)-Überschuss von 100.000:1 eintritt. Mittels TRLFS konnten verschiedene aquatische U(VI)-ISA Spezies im entsprechenden pH-Bereich beobachtet werden, welche für die Sorptionsminderung verantwortlich sind. Die notwendigen hohen ISA-Konzentrationen sind allerdings im Endlager nicht zu erwarten, so dass eine U(VI)-Mobilisierung durch ISA unter alkalischen Bedingungen unwahrscheinlich ist.

Untersuchungen zur potentiell mobilisierenden Wirkung polymerer Zementfließmittel am Beispiel des Systems [¹⁵²Eu]Eu(III)/PCE MasterGlenium® 51/Ca-Bentonit (pH 9-13; 0-3 M CaCl₂) haben ergeben, dass das Adsorptionsverhalten von Eu auch bei sehr geringer Konzentration ausschließlich durch den Elektrolyteffekt bestimmt wird. Die in Abwesenheit von Elektrolyten starke Komplexbildung wird bereits bei moderaten Ionenstärken vollständig unterbunden, so dass aufgrund des chemischen Milieus in Zementssystemen und der entsprechend starken Metall-Adsorption im Falle einer Freisetzung der intakten Polymere nicht mit Carrier-Effekten zu rechnen ist.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Stabilität der U(VI)/C-A-S-H-Phasen in verschiedenen Salzlösungen (2.5 M NaCl/0.02 M NaHCO₃ und 0.02 M NaHCO₃) wird mittels Leachingexperimenten ermittelt.

Weiterhin sollen systematische Untersuchungen zum Einfluss von Ca²⁺ auf die Radionuklidrückhaltung an Ca-Bentonit bei hohen pH-Werten durchgeführt werden. Es soll gezeigt werden, dass Ca²⁺ die Radionuklidsorption unter alkalischen Bedingungen fördert oder sogar erst ermöglicht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Wolter, J.-M., Schmeide, K., Weiss, S., Bok, F., Brendler, V., Stumpf, T.: Stability of U(VI) doped calcium silicate hydrate gel in repository-relevant brines studied by leaching experiments and spectroscopy. *Chemosphere* 218, 241-251 (2019).

Wolter, J.-M., Schmeide, K., Huittinen, N., Stumpf, T.: Cm(III) retention by calcium silicate hydrate (C-S-H) gel and secondary alteration phases in saline carbonate solutions – A site-selective TRLFS and XRD study. *Cement Concr. Res.* (under review).

Philipp, T., Shams Aldin Azzam, S., Rossberg, A., Huittinen, N., Schmeide, K., Stumpf, T.: U(VI) sorption on Ca-bentonite at (hyper)alkaline conditions – Spectroscopic investigations of retention mechanisms. *Sci. Total Environ.* (under review).

Philipp, T., Schmeide, K., Rossberg, A., Stumpf, T.: U(VI) sorption by Ca-bentonite at pH 8-13: Spectroscopic investigation of retention mechanisms. Vortrag: 28th Goldschmidt Conference 2018, 12.-17.08.2018, Boston, USA.

Dullies, Paul: Untersuchungen zum Einfluss von Isosaccharinsäure auf die U(VI)-Rückhaltung an Ca-Bentonit unter alkalischen Bedingungen. Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (08.01.2019).

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 E 11415C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 885.255,00 EUR	Projektleiter: 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 (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 die Auswertung und Zusammenstellung der experimentellen Daten zu den Th (IV) -, U (VI) - und Nd (III) -Screening-Experimenten abgeschlossen und ein Manuskript für eine Peer-Review-Veröffentlichung erstellt. Das Manuskript wird derzeit einem internen Review-Prozess unterzogen.

Die detaillierten Studien zur Löslichkeit von Th(IV) in Anwesenheit von Gluconat (GLU) und Citrat (CIT) als organische Zementadditive bzw. Modellliganden wurden ebenfalls beendet. Die Ergebnisse zeigen definitiv eine Erhöhung der Löslichkeit mit steigender Ligandenkonzentration. Ein thermodynamisches Modell zur Beschreibung der Experimente wird derzeit entwickelt.

Experimente im Rahmen der Erweiterungsphase von GRaZ wurden mit den binären Systemen Ca-GLU und Ca-Nd-GLU begonnen. Zusätzlich wurden ^{13}C NMR Messungen am binären System Ca-GLU durchgeführt. Für die Experimente im ternären System wurde die Festphase $\text{Nd}(\text{OH})_3(\text{s})$ über eine Hydratation von $\text{Nd}_2\text{O}_3(\text{cr})$ hergestellt. Mit dieser Festphase wurden Löslichkeitsexperimente in Gegenwart von GLU in verdünnter bis konzentrierter NaCl-, MgCl_2 - und CaCl_2 -Lösung angesetzt.

Im Rahmen von AP2 wurden Sorptionsexperimente von Cm(III) mit dem Tonmineral Montmorillonit unter den gleichen Bedingungen begonnen wie sie bereits für Illit durchgeführt wurden. Die Proben wurden mittels zeitaufgelöster Laserfluoreszenz-Spektroskopie (TRLFS) charakterisiert (1 g/L Na-SWy-2, Anwesenheit von 0.01 M GLU, verdünnte bis konzentrierte CaCl_2 - und NaCl-Lösungen). Um das Sorptionsverhalten möglichst vollständig abzubilden, wurden die Experimente in einem weiten pH-Bereich von $\text{pH} = 3$ -12.5 angesetzt. Ebenfalls wurde unter den gleichen experimentellen Bedingungen der Einfluss von CIT (0.001 M) als Ligand auf den Rückhalt von Cm(III) an Montmorillonit mittels TRLFS untersucht. Die aktuellen spektroskopischen Ergebnisse werden derzeit unter Berücksichtigung aller bisherigen Ergebnisse abschließend ausgewertet und interpretiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Einreichung des Manuskripts zu den Th (IV)-, U (VI)- und Nd (III)-Screening-Experimenten.
- Abschluss der thermodynamischen Modellierung der Systeme Th(IV)-GLU und Th(IV)-CIT.
- Beenden der NMR-Charakterisierung der Proben im Ca-GLU-System.
- Beenden der Nd (III)-Löslichkeitsversuche in verdünnten zu konzentrierten NaCl-Lösungen. Beginn der TRLFS-Messungen in diesen Systemen.
- Auswertung spektroskopischer Untersuchungen (TRLFS) der Cm(III)-Sorption an Illit und Montmorillonit in Anwesenheit von GLU/CIT in NaCl und CaCl_2 Elektrolyt-Lösungen.
- Geochemische Modellierung der Sorption von Eu(III)/Cm(III) an Montmorillonit und Illite in Anwesenheit von GLU/CIT.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universität des Saarlandes, Campus, 66123 Saarbrücken		Förderkennzeichen: 02 E 11415D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 728.871,00 EUR	Projektleiter: Dr. Kautenburger	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

AP7: Untersuchungen zur Rückhaltung von endlagerrelevanten Elementen an Zementphasen mittels dynamischer Sorptionsversuche anhand miniaturisierter Säulenexperimente (MSE)

AP8: Remobilisierung endlagerrelevanter Elemente von Tonstein (Opalinuston/Calcigel)

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Untersuchungszeitraum wurden die Untersuchungen zum Rückhalt verschiedener Elemente des Waste Cocktail an Zement begonnen. Der Zement wurde dafür nach der DIN EN 196-1 mit und ohne Zementzusatz (2-Phosphono-butan-1,2,4-tricarbonsäure, kurz PBTC) hergestellt, im Anschluss gemahlen und dann auf 100 µm gesiebt. Diese Fraktionen wurden dann im Rahmen von Batch-Versuchen bezüglich ihrer Rückhalteeigenschaften gegenüber den Elementen des Waste Cocktail untersucht. Europium(III) und Uranyl(VI) zeigen an Zement eine gute Rückhaltung während gegenüber Cs kein Rückhalt beobachtet werden kann.

Die Untersuchungen mit PBTC als Zementzusatz wurden unter zwei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Zum einen wurde der Zement, welcher direkt bei der Herstellung mit PBTC versetzt wurde, untersucht, zum anderen wurde zu dem zusatzfreien Zement PBTC bei der Probenvorbereitung zugegeben. Diese Unterschiede in der Probenvorbereitung zeigen ebenfalls Unterschiede in den Resultaten. Die genaue Auswertung muss jedoch noch erfolgen.

Weiterhin wurden die Versuche zur Remobilisierung von Elementen des Waste Cocktail von Tongesteinen (Calcigel, Opalinuston) begonnen. Dazu wurden zunächst die Untersuchungen zum Rückhalt (Batch-Versuche) bei pH 12-13 in ACW und 0,1 M NaOH durchgeführt. Im Anschluss an den Sorptions-schritt wurde der Überstand nach dem Zentrifugieren quantitativ entfernt und der Ton erneut mit Flüssigkeit (ACW) versetzt, aufgeschüttelt und für 72 h in einem Schüttler equilibriert. Es wurden 3 bis 4 Remobilisierungsschritte durchgeführt, wobei jedes Mal nach dem Zentrifugieren der Überstand quantitativ abgenommen und der Feststoff weiterbearbeitet wurde. Um den pH-Abfall im Endlager durch die Zementalteration zu simulieren, wurde dabei bei jedem Mobilisierungsschritt der pH-Wert um etwa eine Einheit reduziert, bis beim letzten Remobilisierungsschritt ein pH-Wert von 8 eingestellt wurde. Die Experimente zur Remobilisierung der Elemente erfolgten dabei mit den gleichen Ionenstärken, die für die Untersuchungen zum Rückhalt verwendet wurden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im nächsten Untersuchungszeitraum werden die Arbeiten zu den Arbeitspaketen der Verlängerungsphase AP6 bis AP8 durchgeführt. Dazu sollen die begonnenen Untersuchungen zur Retention von endlagerrelevanten Elementen und Elementgemischen an Zementphasen mittels Batch- und MSE-Versuchen auch unter dem Einfluss von PBTC als Zusatzmittel weitergeführt und die Untersuchungen zur Remobilisierung abgeschlossen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		Förderkennzeichen: 02 E 11415E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 725.850,00 EUR	Projektleiter: Dr. Krüger	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Vorhabensziele:

- Quantenmechanische Modellierung der Sorption von Actiniden an C-S-H-Phasen
- Quantenmechanische Modellierung der Komplexierung 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

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

Als Beispiel einer C-S-H-Kantenfläche wurde erstmals die Oberfläche (100) des 14 Å-Tobermorits ($C/S = 0.67$) modelliert (AP1.2). Diese Oberfläche ist parallel zu den SiO_4 -Tetraederreihen des Minerals und zeigt keine wesentlichen Strukturabweichungen zum Festkörper. Für einen U(VI)-Sorptionskomplex auf tridentatem Platz (AP1.3) wurde eine ähnliche

Geometrie wie in der Zwischenschicht erhalten. Optimierungen zu U(IV)-Sorptionskomplexen in der Zwischenschicht des C-S-H-Modells 14 Å-Tobermorit wurden für weitere C/S-Werte vervollständigt, verbessert und um weitere Plätze analog zu U(VI) ergänzt. Der Vergleich mit EXAFS-Messungen der Projektpartner zu Np(IV) und Pu(IV) deutet auf eine gegenüber dem Aquaion reduzierte Koordinationszahl hin. Abstände zu Substratkationen variieren mit dem Sorptionsplatz und nicht mit C/S. Die Zahl der OH-Liganden der Komplexe nimmt, eventuell modellbedingt, mit C/S zu. Reduktionspotentiale von U(VI) zu U(IV) in 14 Å-Tobermorit variieren um bis zu 0.4 V zwischen den Plätzen. Modellierungen zur Sorption von U(VI) in 11 Å-Tobermorit wurden begonnen. Bisher wurden Optimierungen für C/S = 0.67 und 0.83 und 5 Sorptionsplätze durchgeführt. Im Gegensatz zu 14 Å-Tobermorit zeigen alle Plätze Bindungen von U(VI) an beide benachbarte Mineralschichten. Dies bedingt höhere Koordinationszahlen und eine größere Zahl von U-Si-Abständen, was EXAFS-Ergebnissen besser entspricht. Es werden jedoch weniger U-Ca-Abstände gefunden, insbesondere keine kürzeren der Länge von etwa 380 pm, wie gemessen. Verbesserungen der Ergebnisse durch dynamische Equilibrierung werden derzeit durchgeführt, um diese Befunde abzusichern. Modellierungen zu U(IV)-Hydroxokomplexen (AP2.1) wurden mit Rechnungen zu bevorzugten Koordinationszahlen abgeschlossen. Die niedrigste Koordinationszahl von 6 wird für Tri- bis Hexahydroxokomplexe erreicht. Weiterhin wurden U(IV)-Carbonatkomplexe $U(CO_3)_n^{4-2n}$ für $n = 1-5$ modelliert (AP2.1). Dabei wurden teils niedrigere Koordinationszahlen als für das U(IV)-Aquaion (CN = 9) erhalten, mit einem Minimum von 7-8 für den Tricarbonatkomplex. Carbonat ist in allen Komplexen bidentat koordiniert, mit Ausnahme des Pentacarbonats mit zwei monodentaten Liganden. Energien der Carbonataddition zeigen, dass der Tetracarbonatkomplex existieren dürfte, der vorgeschlagene Pentacarbonatkomplex jedoch wohl nicht. Derzeit wird die Stabilisierung anionischer U(IV)-Carbonatkomplexe durch Ca^{2+} untersucht (AP2.2). Für die neutralen ternären Komplexe mit 3 und 4 Carbonatliganden, $CaU(CO_3)_3H_2O^0$ und $Ca_2U(CO_3)_4^0$, wurde nur ein geringer Einfluss des Ca-Ions auf die Geometrie gefunden, was einen experimentellen Nachweis erschwerte. Weiterhin wurde untersucht, ob dimere U(VI)-Komplexe mit verbrückendem Carbonat, $(UO_2)_2CO_3^{2+}$ möglich sind (AP2.1), in Analogie zur wohlbekannten Spezies $(UO_2)_2(OH)_2^{2+}$. Betrachtet wurden fünf Isomere mit variierender Koordinationsmode des Carbonats und Koordinationszahl des Uranyl. Bevorzugt sind Strukturen mit fünffach koordiniertem Uranyl und beidseitig bidentater Carbonatkoordination. Isomere mit gemischter mono- und bidentater Carbonatkoordination sind lediglich etwa 20 kJ/mol weniger stabil. Der bevorzugte Dimerkomplex ist stabil gegen Dissoziation in UO_2^{2+} und $UO_2CO_3^0$, so dass der Vergleich mit $(UO_2)_2(OH)_2^{2+}$ nahelegt, dass derartige Spezies bei erhöhter Carbonatkonzentration existieren können.

4. Geplante Weiterarbeiten

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

AP2.1: Carbonatkomplexe

AP2.2: Ternäre Komplexe mit Lösungskationen

5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag A. Kremleva, S. Krüger, N. Rösch: Quantum Chemical Modeling of U Sorption on Calcium Silicate Hydrate, 4. Internationaler Workshop Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy, 6.-9. November 2018, Nizza, Frankreich.

Zuwendungsempfänger: Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam		Förderkennzeichen: 02 E 11415F
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 485.645,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Kumke	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die pH - ($11.0 \leq pH \leq 12.6$) und Reaktionszeit-abhängige ($t \leq 170$ d) Sorption von Eu(III) an Ettringit sowie Hydrogranat (Kooperation FZ Jülich) wurde mit TRLFS untersucht (AP1). Im Fall von Ettringit wurde neben Eu(III)-hydroxid eine oberflächensorbierte und eine eingebaute Eu(III)-Spezies (Ca(II)/Eu(III)-Austausch) gefunden. Die Geschwindigkeit des Einbaus steigt bei höheren pH -Werten. Bei der Sorption von Eu(III) an Hydrogranat wurde für pH 11 und 12 neben der Bildung von Eu(III)-hydroxid eine oberflächensorbierte Eu(III)-Spezies beobachtet, während bei pH 12.6 zusätzlich eine eingebaute Eu(III)-Spezies gefunden wurde.

Ein Energietransfer zwischen an CSH-Phasen ($C/S = 0.7$ bzw. 1.3 , $pH = 12$) sorbierten Eu(III) und Nd(III) wurde, aufgrund des zu großen Abstandes zwischen den beiden Ln(III)-Ionen nach Einbau in die CSH-Struktur, vorrangig nur bei kurzen Sorptionszeiten ($t = 20$ min) beobachtet.

Die TRLFS-Untersuchung des Einflusses organischer Zementzusätze auf den frühen Hydrationsprozess ($1 \text{ h} \leq t \leq 24 \text{ h}$ und $t = 28 \text{ d}$) verschiedener Zementssysteme wurde abgeschlossen (Kooperation BAM). Für die Analyse der relativen prozentualen Anteile der nebeneinander an verschiedenen Zementalterationsphasen vorliegenden Eu(III)-Spezies wurde eine Funktion aus den spektralen Signaturen der Eu(III)-Lumineszenzspektren aller bisher einzeln untersuchten Eu(III)-Spezies an Zementalterationsphasen erstellt. Dabei wurde beobachtet, dass nach einer Hydrationszeit von 24 h nicht wie erwartet die Sorption an CSH dominiert, sondern an Portlandit.

Die TRLFS-Tieftemperaturuntersuchungen der Eu(III)-Interaktion mit Ca-Montmorillonit ($10 \leq pH \leq 12$) zeigten eine Kantensorption am Ton sowie eine Einbauspezies an Sekundärphasen (AP2). Eine Abhängigkeit vom pH -Wert bzw. Hintergrundelektrolyten (Milli-Q-Wasser, NaCl, Gipshut-Lsg.) konnte für die Kantensorption nicht festgestellt werden, während die Einbauspezies bei höherem pH -Wert und/oder hoher Ionenstärke dominanter erscheint.

Transienten-Absorptionsspektroskopie (AP4) zur U(VI) Lumineszenzlöschung durch Chlorid und Bromid Komplexe ($c_{Cl^-/Br^-} = 0 \text{ M}$ bis 1 M , pH 0) in wässriger Lösung zeigten einen Desaktivierungsmechanismus über die Bildung der jeweiligen Biradikale. Die exakte Analyse der Daten mittels PARAFAC und der Erarbeitung eines detaillierten Löschmechanismus stehen noch aus. Weiterhin wurden erste Testmessungen zu Transienten-Absorption an Festphasen durchgeführt, wobei als Modellsystem Eu(III) an CSH-Phasen gewählt wurde.

4. Geplante Weiterarbeiten

Um eventuelle Strukturänderungen während des Sorptionsprozesses von Eu(III) an Ettringit und Hydrogranat zu untersuchen, werden weitere analytische Methoden, wie ICP-OES, Raman-Mikroskopie, Elementaranalyse sowie XRD genutzt werden.

Für eine genauere Untersuchung der Sekundärphasenbildung sollen weitere spektroskopische Tieftemperaturmessungen sowie strukturanalytische Untersuchungen für die Interaktion von Eu(III) mit Ca-Montmorillonit für ausgewählte Kontaktzeiten durchgeführt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

K. Burek, F. Krause, M. Schwotzer, A. Nefedov, J. Suessmuth, T. Haubitz, M. Kumke, P. Thissen: "Hydrophobic properties of Calcium-Silicate-Hydrates doped with rare-earth Elements", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6 (11), pp 14669–14678 (2018).

T. Haubitz, S. Tsushima, R. Steudtner, B. Drobot, G. Geipel, T. Stumpf, M. U. Kumke: "Ultrafast transient absorption spectroscopy of UO_2^{2+} and $[UO_2Cl]^{+}$ " *The Journal of Physical Chemistry A*, 122 (35), pp 6970–6977 (2018).

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11415G
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 323.098,00 EUR	Projektleiter: 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 alkalinen 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 alkalinen 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. TiO_2) als Funktion der Ionenstärke, Anpassung/Entwicklung entsprechender der Auswerterroutinen 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:

- Mit den Untersuchungen an Calcium-Aluminat-Hydratphasen (C-A-H) wurden begonnen. Ausgehend von C₃A- und CA₂-Precursor wurden verschiedene Calcium-Aluminat-Hydratphasen hergestellt. Es wurden sowohl pure als auch Eu(III)- und/oder additivhaltige C-A-H-Phasen präpariert.
- ATR-FT-IR-Messungen von Nd(III)-, Malat und Nd(III)malat dotierten C-S-H-Phasen (C/S = 1.0, als KBr-Presslinge) ergaben, dass Malat nur oberflächlich an CSH-Phasen sorbiert als outer sphere Komplex vorliegt. Wenn sowohl Nd(III) als auch Malat in den CSH-Phasen vorliegen, ist eine deutliche Verschiebung der symmetrischen und asymmetrischen Streckschwingung der Carboxylgruppen des Malats im Vergleich zur reinen mit Malat dotierten C-S-H-Phase zu verzeichnen. Gleichzeitig findet eine Verschiebung der Si-O-Streckschwingung, der Si-O-Si-Deformationsschwingung und der Si-O-Si-Streckschwingung statt. Die Schwingung der Si-O(Q1)-Tetraeder verschwindet. Dies lässt auf eine mögliche Sorption des Nd-Malat-Komplexes an die Si-Tetraeder schließen. Weiterhin wurden ²⁹Si- und ¹³C –NMR-Messungen (Auswertung noch in Arbeit) an diesen C-S-H-Phasen durchgeführt. Diese NMR-Messungen sowie geplante weitere ATR-FT-IR-Messungen sollen letztendlich sicher Aufschluss darüber geben, ob ein Nd(III)-Malat-Komplex in den CSH-Phasen vorliegt.
- Mit der spektroskopischen Charakterisierung (UV-Vis) zur Komplexierung von Eu(III) mit Tartrat (Weinsäure) von sauren bis alkalinen pH-Bereich wurde begonnen.
- Anfertigung einer Publikation (s. Punkt 5).

4. Geplante Weiterarbeiten

- Fortführung der ²⁹Si- und ¹³C –NMR- und ATR-FT-IR Messungen an den diversen C-S-H und an C-A-H-Phasen
- Experimente zur Charakterisierung der Sorption von Eu(III), Eu(III)-Malat und Eu(III)-Tartrat an C-A-H-Phasen
- Fortführung der mikro-titrationskalorimetrischen Charakterisierung der Komplexierung von Eu(III) mit verschiedenen PCE's

5. Berichte, Veröffentlichungen

F. Taube, B. Drobot, A. Rossberg, H. Foerstendorf, M. Acker, M. Patzschke, M. Trumm, S. Taut, T. Stumpf: Thermodynamic and Structural Studies on the Ln(III)/An(III) Malate Complexation, *Inorganic Chemistry* 58, 368-381 (2019)

Vortrag:

F. Taube, A. Rossberg, H. Förstendorf, M. Acker, T. Stumpf: *Ln(III)/An(III) sorption on CSH phases and the influence of malate*, 4th International on Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy ATAS, 06.-09.11.2018, Nice, Frankreich

Posterbeitrag:

A. Rossberg, F. Taube, M. Trumm, M. Acker, T. Stumpf: *Complex formation of americium with malate: Linking EXAFS with AIMD simulations and XRD*. 4th International on Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy ATAS, 06.-09.11.2018, Nice, Frankreich

Zuwendungsempfänger: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Seminarstr. 2, 69117 Heidelberg		Förderkennzeichen: 02 E 11415H
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2015 bis 29.02.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 451.538,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Panak	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

AP3: Untersuchungen zur radiolytischen Stabilität von verschiedenen Superplasticizern.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Komplexierungsverhalten dreiwertiger Lanthaniden und Actiniden mit einfachen polycarboxylischen Liganden wurde eingehender untersucht. Dazu wurden laserspektroskopische Messungen zur Wechselwirkung von Eu(III) und Cm(III) mit Polyacrylaten unterschiedlicher Kettenlänge ($M_w = 2100$ und 5100 g/mol) als Funktion der Temperatur ($20 - 60$ °C) in 0.1 M NaCl Lösung ($[H^+] = 10^{-4}$ M) durchgeführt. Für Eu(III) und Cm(III) wird eine hervorragende Übereinstimmung der Stabilitätskonstanten erhalten. Für alle Systeme wird neben dem Aquoion nur eine Komplexspezies beobachtet. Die Speziation verschiebt sich in Folge der stärkeren Deprotonierung der Liganden mit steigender Temperatur hin zu den Komplexspezies. Zwar liegen die bestimmten Stabilitätskonstanten in einem ähnlichen Bereich wie die entsprechenden Werte verschiedener natürlicher (Humin-, Fulvinsäuren) und synthetischer (Superplasticizer) Polycarboxylate, jedoch zeigen beide Polyacrylate im untersuchten Bereich keinen signifikanten Temperatureinfluss hinsichtlich der Komplexstabilität. Sowohl für Eu(III) als auch für Cm(III) wird im untersuchten Temperaturbereich ein nahezu konstanter Wert für $\log \beta'(T)$ erhalten, der um 5.5 ± 0.2 schwankt.

Darüber hinaus wurden erste Komplexierungsuntersuchungen von NpO_2^+ mit den Dicarboxylaten Oxalat, Malonat und Succinat durchgeführt. Die Speziation mittel UV/Vis zeigt, dass in allen Fällen $NpO_2(L)_n^{1-2n}$ -Komplexe mit $n = 1, 2$ mit steigender Ligandkonzentration gebildet werden, wobei die Komplexierungsstärke mit zunehmender Kettenlänge des Kohlenstoffgerüsts in der Reihenfolge Oxalat, Malonat, Succinat abnimmt. Die Daten befinden sich aktuell in der Auswertung.

Im Rahmen einer Kooperation mit der TU Dresden wurden ein kommerzieller (Glenium 51[®]) sowie verschiedene synthetische (Kooperation mit der TU München, Lehrstuhl Bauchemie) Polycarboxylat Superplasticizer bestrahlt um die Auswirkungen radiolytischer Zersetzung zu untersuchen. Die Bestrahlung erfolgte mit einer Co-60 Quelle über einen Zeitraum von 27 Tagen und 4 Stunden bei einer Dosisleistung von ca. 0.58 kGy/d. In Zusammenarbeit mit dem organisch-chemischen Institut der Universität Heidelberg sollen die bestrahlten Proben nun massenspektrometrisch untersucht werden, wobei die Identifikation kleiner Zersetzungsprodukte im Fokus stehen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- TRLFS Untersuchungen zur Komplexierung von Cm(III) mit kleinen und polymeren organischen Liganden als potentielle Abbauprodukte komplexer Superplasticizer.
- Auswertung der Daten zur Komplexierung von NpO_2^+ mit den Dicarboxylaten Oxalat, Malonat und Succinat.
- Charakterisierung der bestrahlten Superplasticizer zur Identifikation relevanter radiolytischer Abbauprodukte.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Fröhlich, D. R., Koke, C., Maiwald M. M., Chomyn, C., Plank, J., Panak, P. J.: A spectroscopic study of the complexation reaction of trivalent lanthanides with a synthetic acrylate based PCE-superplasticizer, *Spectrochim. Acta A*, 2019, 207, 270-275

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Clausthal, Adolf-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		Förderkennzeichen: 02 E 11425
Vorhabensbezeichnung: Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken – Bautechnische Realisierung Technikumsprüfstand mit Durchführung und Auswertung erster Versuche (Salzschnittblöcke)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2015 bis 31.07.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.07.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.236.883,23 EUR	Projektleiter: 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.

AP10: Schlussbericht fertig gestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Vorhaben abgeschlossen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Düsterloh, U. (2015): Design of a pilot plant to analyze sealing systems based on a bricking of rock salt, In: The Mechanical Behavior of Salt VIII, CRC Press Balkema, Taylor and Francis Group, London UK, 2015.

Düsterloh, U. (2017): Konzeption, Untersuchung und Modellierung eines Abdichtungselementes aus Salzschnittblöcken zum Nachweis der Barrierenintegrität, Fachgespräch Verschlussysteme - Konzepte/Baustoffe/Demonstration/Anwendung, Freiberg, 03.-04. Mai 2017.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		Förderkennzeichen: 02 E 11435
Vorhabensbezeichnung: MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl ₂ -Lösung (MgO-SEAL)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2015 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.123.669,00 EUR	Projektleiter: 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. Bericht liegt vor.

AP2: Untersuchungen sind abgeschlossen. Erstellen der Berichtsteile.

AP3: Die Belastungen des GV2-Bauwerkes bei konstanter Flüssigkeitsdruck wurden fortgesetzt. Es wurden die konstanten Druckstufen 3 bar, 6 bar und 9 bar ausgewertet. Die sich mit der Zeit einstellenden Volumenströme sind generell $< 0,1$ l/h und nähern sich einem Wert von ca. 0,01 l/h. Dies entspricht einem auf den Gesamtquerschnitt bezogenen spezifischen Volumenstrom von $0,007$ m³/a/m².

In den Bohrungen B40 und B41 wurde bei einem weiteren Impulstest eine Permeabilität von $3 \cdot 10^{-20}$ m² gemessen, die für den intakten Dammkörper typisch sind. Die Bohrungen B38 und B39 schneiden Bereiche mit lokalen Fehlstellen an. In beiden Bohrungen hat sich aber infolge der Wechselwirkungen zwischen der Lösung und dem MgO-Beton die Lösungspemeabilität mit der Zeit auf einen Wert von ca. 10^{-19} m² verringert.

AP4: Abschluss der Untersuchungen.

AP5: Die Gespräche mit dem MgO-Hersteller STYROMAG verliefen erfolgreich. Es wurden Kenngrößen zur MgO-Qualität abgesprochen und Probelieferungen vereinbart.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: Erstellen des Teilberichtes.

AP3: Abschluss der Bohrlochversuche. Belastung der Druckkammer GV2 bei einem konstanten Flüssigkeitsdruck von 15 bar.

AP4: Erstellung des Teilberichtes.

AP5: Abschluss der Arbeiten. Fertigstellung des Entwurfs des Abschlussberichtes.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Dr. Andreas Hampel, Grünberger Str. 56, 55129 Mainz		Förderkennzeichen: 02 E 11446A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 330.429,00 EUR	Projektleiter: 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“ (KO-SINA) auf. Da dort keine Laboruntersuchungen und Weiterentwicklungen der Stoffmodelle durchgeführt werden, bilden die Arbeiten in diesem Verbundprojekt eine notwendige methodische Absicherung und wichtige Ergänzung der in beiden Vorhaben eingesetzten geomechanischen Rechenverfahren und Datensätze.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

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

Im Berichtszeitraum berechnete der ZE im AP2 einen Kriechversuch des IfG aus AP1, der mit einer 100 Tage langen isostatischen Konsolidierung zur Reduzierung einer möglichen Probenverschädigung aus der Gewinnung und Präparation begann. Diese Phase wurde mit dem Verheilungsmodul im CDM-Stoffgesetz unter Annahme einer sekundären Anfangsporosität berechnet, so dass die bei der Konsolidierung gemessene axiale Verformung gut wiedergegeben wurde. Außerdem berechnete der ZE drei Verheilungsversuchsserien und verglich die Ergebnisse mit inzwischen vorliegenden Laborversuchsdaten der TU Clausthal. Die Daten ergeben allerdings noch kein klares Bild, wie die Verheilung von der Spannung abhängt. Daher sind zur Weiterentwicklung bestehender Modellierungsansätze weitere Versuche geplant. Der Partner Sandia hat im AP4 erste Ergebnisse von Laborversuchen mit geschichteten Steinsalzproben aus den USA vorgestellt, die bei der Firma RESPEC in Rapid City, SD, USA durchgeführt wurden. Auch dieses Versuchsprogramm wird fortgeführt. Im AP5 simulieren die Partner die Entwicklung der Schädigungszone im Saum einer offenen Strecke in den ersten 30 Jahren nach der Auffahrung und deren Rückbildung in den folgenden 70 Jahren nach Einbau eines Dammbauwerkes.

Im Berichtszeitraum beteiligte sich der ZE an folgenden Projektworkshops: Nr. 14 am 08.-09.09. in Goslar, Nr. 15 am 24.-25.10. in Leipzig und Nr. 16 am 17.-18.12. in Braunschweig. Außerdem hat der ZE gemeinsam mit den Partnern Ergebnisse des Verbundes auf dem 9th US-German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation am 10.-11.09. und auf der Saltmech IX am 12.-14.09. in Hannover präsentiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die gemeinsame Bearbeitungszeit aller Partner endet gegenwärtig am 31.03.2019. Aufgrund der bisher im Verbundprojekt durchgeführten experimentellen und theoretischen Arbeiten und der dabei erlangten Ergebnisse und Erfahrungen wurden für die Arbeitspakete 1 bis 5 die bestehenden Untersuchungsprogramme überarbeitet und neue Arbeiten formuliert. Diese sind notwendig, um eine verbesserte und zuverlässigere Grundlage für die Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung zu schaffen. Für die Arbeiten ist eine Verlängerung des Vorhabens um 2 ½ Jahre vom 01.04.2019 bis zum 30.09.2021 beantragt. Für die Erstellung des Syntheseberichtes über die gesamte Projektlaufzeit von fünfeneinhalb Jahren ist im Teilprojekt A eine anschließende Bearbeitungszeit von sechs Monaten bis zum 31.03.2022 beantragt.

Auf den weiteren Projektworkshops werden die Partner ihre Ergebnisse präsentieren und daraus folgende Arbeiten festlegen. Workshop 17 ist für den 18.-19.02.2019 in Hannover geplant.

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), ISBN 978-3-9814 108-6-0

Zuwendungsempfänger: IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstr. 60, 04279 Leipzig		Förderkennzeichen: 02 E 11446B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 545.980,00 EUR	Projektleiter: 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 8. bis 9. September den 14. Projekt-Workshop in Goslar, am 24./25. Oktober den 15. Projekt-Workshop in Leipzig sowie am 17./18. Dezember in Braunschweig den 16. 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 14., 15. und 16. Projekt-Workshop gemeinsam mit den Partnern vorbereitet und durchgeführt. Auf den Workshops wurden die Ergebnisse der bisherigen Planungen und Arbeiten und die Zusammenarbeit mit Sandia National Laboratories sowie der BGR (zum AP1) vorgestellt und diskutiert.

Auf den drei 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.

Bei Testversuchen mit Stahl-Dummys an den neuartigen Kriechversuchsständen im 1. Halbjahr hatte sich gezeigt, dass zur Konstanthaltung der Einspannung der Prüfkörper mit der erforderlichen Genauigkeit eine verbesserte Regelung erforderlich ist. Im 2. Halbjahr wurde eine entsprechende Druckregelung gebaut und getestet. Gleichzeitig wurde die Klimatisierung in der Klimakammer verbessert.

Außerdem 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 und Präsentation 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 wurden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im 1. Halbjahr 2019 soll die mit den Partnern abgestimmte 1. Serie von drei Kriechversuchen an WIPP-Steinsalzprüfkörpern bei Deviatorspannungen von 2, 4 und 6 MP mit den drei neuartigen Kriechversuchsständen bei einer Temperatur von 120 °C begonnen werden.

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

C. Lüdeling, K. Salzer, R.-M. Günther, A. Hampel, S. Yildirim, K. Staudtmeister, A. Gärken, 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. Proceedings of the 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (Saltmech 9), Sept 12-14, 2018, BGR, Hannover, Germany

Zuwendungsempfänger: Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		Förderkennzeichen: 02 E 11446C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 250.023,00 EUR	Projektleiter: 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 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

In dem Berichtszeitraum hat der Zuwendungsempfänger mit dem von ihm verwendeten und während der Projektlaufzeit weiterentwickelten Stoffmodell Lubby-CF weitere Nachberechnungen neuer Verheilungsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse aus der Nachberechnung haben gezeigt, dass eventuell eine Optimierung des angewendeten Verheilungsansatzes erforderlich wird. Mit den gegenwärtig vorhandenen Versuchsdaten ist dies derzeit jedoch kaum zu realisieren, da relativ wenige Versuchsergebnisse vorhanden sind. Des Weiteren hat der Zuwendungsempfänger den beim Projektpartner IfG durchgeführten Kriechversuch TCC34 mit seinem Stoffmodell nachgerechnet und analysiert.

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. AP1 wurden vom Projektpartner IfG neue Versuchsaapparaturen konstruiert. Die Kriechversuche zu diesem AP laufen aktuell weiter. Sofern weitere Ergebnisse zu den Kriechversuchen bei kleinen Differenzspannungen vorliegen, werden im Rahmen vom AP1 weitere Untersuchungen durchgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Universitätsplatz 2, 38106 Braunschweig		Förderkennzeichen: 02 E 11446D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 233.387,00 EUR	Projektleiter: 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 Goslar (08.-09.09.), Leipzig (24.-25.10.) und Braunschweig (17.-18.12.) durchgeführt. Außerdem fand in Hannover die Saltmech IX statt, auf welcher der Zuwendungsempfänger Arbeiten zum Stoffmodell TUBSSalt vorstellte.

Im Berichtszeitraum rechnete der Zuwendungsempfänger drei Verheilungsserien nach. Der einheitliche Parametersatz wurde an den Versuchsergebnissen der TUC kalibriert. Es bleiben einige Phänomene in den Ergebnissen zu klären.

Durch eine gesonderte Anpassung der Parameter konnte der Verheilungsversuch Asse769 nun nachgerechnet werden.

Bei der Nachrechnung eines Kriechversuchs, der am IfG durchgeführt wurde, wurden verschiedene Optionen untersucht, mit der eine Anfangsporosität berücksichtigt werden kann. Die bisherigen Versuche führten leider nicht zum gewünschten Ziel.

Mit dem Modell des Virtuellen Demonstrators der LUH wurden Berechnungen durchgeführt, die allerdings ab Einbau des Damms zu numerischen Problemen führen. Es wurden verschiedene Ursachen für die numerischen Probleme untersucht, bisher jedoch ohne Erfolg.

4. Geplante Weiterarbeiten

Zu den Verheilungsversuchen sind weitere Vergleichsberechnungen der Partner an einem einheitlichen Modell mit den jeweiligen Stoffmodellen und den angepassten Parametern für die Series 1 bis 3 geplant. In Hinblick auf die bisherigen Ergebnisse der Nachrechnungen ist von einer Weiterentwicklung des Verheilungsansatzes von TUBSSalt auszugehen. Dafür sind eine zuverlässige Grundlage an Versuchsergebnissen und somit die weitere Durchführung von Versuchen notwendig.

Die Implementierung einer Anfangsporosität wird weiterhin untersucht.

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

Aufgrund der bisher im Verbundprojekt durchgeführten experimentellen und theoretischen Arbeiten und der dabei erlangten Ergebnisse und Erfahrungen wurden für die Arbeitspakete 1 bis 5 die bestehenden Untersuchungsprogramme überarbeitet und neue Arbeiten formuliert. Für die Arbeiten ist eine Verlängerung des Vorhabens um 2,5 Jahre beantragt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Aktuelle Berichte und Veröffentlichungen zum Stoffmodell TUBSSalt:

Hente, F. J.; Gärken, A.; Stahlmann, J. (2018): Einfluss des Hohlraumquerschnitts auf die Verheilung im Steinsalz, *geotechnik*, 41. Jahrgang, Heft 4, S. 264-271, Ernst & Sohn, Berlin

Gärken, A.; DeVries, K. L.; Stahlmann, J. (2018): Advanced development of the constitutive model TUBSSalt for rock salt regarding the influence of Lode angle effects. *The Mechanical Behavior of Salt IX*, 12.-14.09.2018, Hannover

Gärken, A.; Missal, C.; Stahlmann, J. (2018): Study of an in-situ-problem under room temperature and heated conditions with the constitutive model TUBSSalt for rock salt. *The Mechanical Behavior of Salt IX*, 12.-14.09.2018, Hannover

Missal, C.; Stahlmann, J. (2018): A Relation of Anisotropic Damage and Permeability in the EDZ of Drifts in Rock Salt. *The Mechanical Behavior of Salt IX*, 12.-14.09.2018, Hannover

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		Förderkennzeichen: 02 E 11446E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 406.332,00 EUR	Projektleiter: 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 8. September in Goslar, am 24./25. Oktober in Leipzig sowie am 17./18. Dezember in Braunschweig die Projekt-Workshops 14 bis 16 durch.

Auf dem Workshop in Goslar mit Teilnahme des assoziierten Projektpartners Sandia National Laboratories Albuquerque wurden aktuelle Projektthemen sowie die WEIMOS-Präsentationen für die nachfolgende SaltMechIX-Konferenz in Hannover diskutiert. Der Zuwendungsempfänger präsentierte in dem Zusammenhang seinen Vortrag über die im Vorhaben durchgeführten laborativen Untersuchungen bei kleinen deviatorischen Spannungen (AP1) sowie zur Schädigungsrückbildung (AP2). Der aktuelle Stand zu der im Berichtszeitraum laufenden Versuchsserie zur Schädigungsrückbildung wurde vom Zuwendungsempfänger jeweils auf den anschließenden Workshops präsentiert und vorläufige Versuchsdaten den anderen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. In Leipzig wurde festgelegt, die laufenden Versuche dahingehend zu verändern, dass von den unterschiedlichen isotropen Beanspruchungen in den einzelnen Versuchen ein Wechsel hin zu einer deviatorischen Beanspruchung erfolgt unter Konstanthaltung der kleinsten Hauptspannung, um die Wirkung dieser auf die Verheilung zu untersuchen. Da auf dem Workshop in Braunschweig noch kein eindeutiger Trend nach 3 Wochen Versuchsdauer in der neuen Belastungsstufe zu sehen war, wurde vereinbart, die Versuche bis Januar 2019 fortzuführen. Hinsichtlich der numerischen Analyse der laborativen Untersuchungen zeigte der Zuwendungsempfänger Nachrechnungen eines Langzeitversuchs bei kleiner deviatorischer Beanspruchung (AP1) sowie Nachrechnungen zu den Versuchen im AP2 mit Übergabe der Ergebnisse für einen Vergleich zwischen den Projektpartnern. Zusätzlich wurden neue Simulationen zum Virtuellen Demonstrator (AP5) mit Variation der Verschlussmaterial- und Kontaktflächeneigenschaften und verschiedener Berechnungsmodi durchgeführt und auf dem Workshop in Leipzig vorgestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Der Zuwendungsempfänger wird weitere numerische Simulationen zum Virtuellen Demonstrator (AP5) durchführen. Bei den Verheilungsversuchen wird die aktuelle Serie im Januar 2019 beendet und eine weitere Serie im Anschluss als Wiederholungsserie gestartet werden, da bei dieser zuvor Messungenauigkeiten hinsichtlich der Dilatanzmessung aufgetreten sind und die Ergebnisse daher nur eingeschränkt nutzbar waren.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Hampel, A. et al. (2018): Joint Project III on the Comparison of Constitutive Models for the Mechanical Behavior of Rock Salt: Modeling of the Temperature Influence on Deformation at WIPP*) S. 427-446

Herchen, K. et al. (2018): WEIMOS: Laboratory Investigations of Damage Reduction and Creep at Small Deviatoric Stresses in Rock Salt*) S. 175-192

Lüdeling, C. et al. (2018): WEIMOS: Joint project on further development and qualification of the rock mechanical modelling for the final HWL disposal in rock salt. Overview and first results on tensile stress modelling*) S. 459-472

*) In: S. Fahland, J. Hammer, F. Hansen, S. Heusermann, K.-H. Lux & W. Minkley (eds.): The Mechanical Behavior of Salt (Saltmech IX), Proceedings of the 9th Conference, 12-14 September 2018, Hannover, Germany. Hannover: Federal Institute for Geoscience and Nature Resources (BGR). ISBN 978-3-9814108-6-0

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 E 11456A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e ²), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2016 bis 28.02.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 720.962,00 EUR	Projektleiter: 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^{3f++} 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 fragile Gelschicht während des Überbohrens zu konservieren, wurde zuvor ein Epoxidharz in die Scherzone injiziert. Ein Mock-up Erosionsexperiment aus Plexiglas Komponenten wurde nach vergleichbarer Stabilisierung der Gelschicht im Felslabor überbohrt. Dieser Versuch verdeutlichte die große Bedeutung der Fixierung der Gelschicht vor Beginn des Überbohrens.

Der LIT Mock-up Test wurde fortgesetzt und eine erste Planung zu post-mortem Untersuchungen ist erstellt. Es stehen neben dem LIT Mock-up noch zwei weitere, jedoch inaktive, Erosions-Experimente zur Verfügung. Mit diesen kann die geplante Probennahme- Strategie, speziell der Gelschicht, zunächst getestet werden.

Erste Ergebnisse zur Messung der Redoxpufferkapazität von Kluffüllmaterial des Äspö-Granites zeigen für Material der Korngröße 250 μm bis 500 μm , dass eine schnelle Abnahme der Sauerstoffkonzentration um 65 ppb innerhalb von 50 min bei einer Ausgangskonzentration von $[\text{O}_2] = 92$ ppb gemessen werden konnte. Der beobachtete Sauerstoff-Verbrauch entspricht etwa dem kationenaustauschbaren Fe^{2+} - Gehalt (Huber et al. 2017, *Appl. Geochem.* 80, 90). Die Bohrkernproben für die O_2 - Umlaufsäulen- Experimente sind fertiggestellt.

AP1.2: *Status:* Schwerpunkt der Arbeiten im zweiten Halbjahr 2018 lag weiterhin auf der begleitenden Analytik (geochemisches und Kolloid- Monitoring und RN- Messungen) und Interpretation der Proben von LIT sowie der Vorbereitung und Durchführung des Ausbaus des LIT Experiments. Außerdem wurde zum Ende des Berichtszeitraums das In-situ-Experiment zur Studie des Erosionsverhaltens von Bentonit (MX-80) bei hohem Kompaktierungsgrad (iBET) erfolgreich im Felslabor Grimsel installiert.

- (a) Die letzten Proben aus dem laufenden Betrieb von LIT, wurden für die Messung der Radionuklide an den AMS-Einrichtungen in Wien und München vorbereitet.
- (b) Bei einem Mock-up Experiment wurde die Gelschicht durch die Injektion des ausgewählten Epoxidharzes stabilisiert und anschließend im Felslabor unter vergleichbaren Bedingungen des LIT-Ausbaus überbohrt. Durch eindringendes Bohrfluid wurde dabei ein großer Teil der Quellschicht aus dem System ausgewaschen. Als Grund dafür konnte eine mangelnde Haftung zwischen dem verwendeten Epoxidharz und der glatten Plexiglasoberflächen der Zelle identifiziert werden. Im realen System ist eine bessere Verbindung zu erwarten.
- (c) Der Ausbau des LIT Experiments hat 10/2018 begonnen. Hierzu wurde die Probennahme beendet und zunächst ein Epoxidharz über die Observationsbohrlöcher, zum Schutz der Bentonitquelle während des Überbohrens, injiziert. Nach vollständigem Aushärten des Harzes wurde mit einem Kronenbohrer (360 mm Durchmesser) mit den Überbohrarbeiten begonnen. Bis zum Ende des Berichtszeitraums konnte die Bohrung bis zu einer Tiefe kurz vor dem Experiment (6 m von der Tunnelwand) fertiggestellt werden.

AP2.2: *Status:* Die thermodynamischen Simulationsrechnungen sind auf Mischwässer ausgeweitet worden. Der Einfluss von pH-, E_h , Karbonat-Konzentration und Eisenkonzentration auf die Speziation und Löslichkeit der Radionuklide in Bentonit-/Grimsel/Mischwässern wurde bestimmt. Teile diese Ergebnisse wurden im Rahmen des von GRS/KIT organisierten internationalen „*CFM Workshop on thermodynamic benchmark calculations*“ diskutiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1 & 2: Schwerpunkt der nächsten 6 Monate werden, neben den laufenden Laborversuchen und Modellierungen, der Ausbau und die post-mortem Untersuchung von LIT sein. Die Planung sieht die Bergung des Experiments noch im Februar 2019 vor. Der gezogene Kern wird mit einer Epoxidharzschicht versiegelt und durch einen CT-Scan (EMPA, CH) zunächst ein Überblick über den Zustand des Experiments und des Nahbereichs erstellt. Anschließend wird mit der Demontage des Kerns und der Probennahme zur post-mortem Untersuchung begonnen. Die Kinetik der Umlaufsäulenversuche mit verschiedenen Bohrkernlängen bei gepulster O_2 -Injektion soll untersucht werden und die Redoxkapazitätsmessungen auf die restlichen Korngrößen des Kluffüllmaterials ausgeweitet werden. Geplant ist eine Publikation in Zusammenarbeit mit GRS zu den Speziations- und Löslichkeitsberechnungen in Bentonit- und Grimselgrundwässern, welche u. a. zur Unterstützung erster Ergebnisse der LIT-Experimente herangezogen werden kann.

AP3: Für KOLLORADO- e^2 wird weiterhin auf Publikationen in peer-review Journalen fokussiert (siehe 5.). Des Weiteren wird der Projektabschlussbericht vorbereitet.

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}Tc in natural water samples with Accelerator Mass Spectrometry. *Anal. Chem.* (submitted)
 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*

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11456B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e^2), Teilprojekt B	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2016 bis 28.02.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 298.115,00 EUR	Projektleiter: 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^{3f++} 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 weiterer spezifischer Rechnungen zum thermodynamischen Benchmark und Beantwortung des Fragebogens.
 Weiterführung der Arbeiten zur Erstellung des Modells zur Simulation der geochemischen und Transport-Prozesse im Nahbereich des LIT-Experiments mit dem Rechenprogramm PHAST.
 Weiterführung der Simulationsrechnungen zu den Durchbruchkurven für U und Np in CFM RUN 13-05 und CRR #32 unter Berücksichtigung der Redoxkinetik.
 Zusammenstellung von Daten für das konzeptuelle Modell zur Diffusion der Radionuklidtracer im Bentonitbuffer des LIT-Experiments. Durchführung von Vorhersage-rechnungen im Hinblick auf erwartete Transportdistanzen der Radionuklide im Bentonit und Abschätzung, ob eine Freisetzung für das jeweilige Radionuklid erwartet wird oder nicht.
 Erstellung eines konzeptuellen Modells zur Durchführung abschätzender Rechnungen zu einem potentiellen kolloidgetragenen Radionuklidtransport im LIT-Experiment.
- AP3: Beginn der Dokumentation für den Abschlussbericht. Gemeinsamer Beitrag zu den thermodynamischen Benchmarkrechnungen mit KIT-INE für das CFM Partner-Meeting in Korea.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: 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.
 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.
 Durchführung abschätzender Rechnungen zu einem potentiellen kolloidgetragenen Radionuklidtransport im LIT-Experiment.
- AP3: Erstellung des Projekt-Abschlussberichts sowie einer Publikation mit den Ergebnissen der thermodynamischen Benchmark-Rechnungen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11466
Vorhabensbezeichnung: Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.3	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.447.555,00 EUR	Projektleiter: Reiche

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Anforderungsanalyse und Wissensmanagement.

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

AP2: Vorarbeiten für die Codeentwicklung.

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

AP3: Codeentwicklung.

Umsetzung der in AP2 erarbeiteten Konzepte in einen Programmcode.

AP4: Test, Qualitätssicherung, Dokumentation.

Umfangreiche Tests werden in allen Programmentwicklungsphasen durchgeführt. Die folgenden QS-Maßnahmen werden umgesetzt: Standardisierung der Arbeitsprozesse, Versions- und Konfigurationsmanagement, Release-Freigabe, Bugtracking, Lokalisie-

nung von Problemen, Programmkommentare, Konventionen, Review des Programm-codes. Die gesamte Entwicklung über alle Phasen wird ausführlich dokumentiert.

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: In den Jahren 2009 bis 2015 wurde von der Fa. BREDEX im Rahmen des Vorhabens ADEMOS (Auftragsnummer 770240, FKZ 02E10367) eine grafische Bedienungs-oberfläche zur Steuerung und Verwaltung von RepoTREND-Rechenläufen entwickelt. Diese GUI hat den Namen XENIA. Es besteht die Notwendigkeit zur Erweiterung von XENIA, um Anforderungen des aktuellen Entwicklungsstands von RepoTREND abzudecken. Ein wichtiger Punkt ist auch die Umstellung der zugrunde liegenden Technologien wie Java und Eclipse (Stand von 2007) auf den aktuellen Stand, um den Einsatz von XENIA auf aktuellen Betriebssystemen für die nächsten Jahre zu sichern. Gemeinsam mit der Fa. BREDEX wurde eine Voranalyse über die notwendigen Arbeiten durchgeführt. Die Umsetzung soll nach dem agilen Verfahren stufenweise erfolgen. Ein Angebot von der Fa. BREDEX über die erste Phase der durchzuführenden Arbeiten liegt vor.
- AP2: Verschiedene direkte und iterative Verfahren zur Lösung von großen Systemen von linearen Gleichungen sowie einige Vorkonditionierungsverfahren wurden evaluiert. Mit dem Ziel der Anbindung des Codes SobolHDMR wurden weitere Testrechnungen mit diesem Code durchgeführt, die detaillierte Codeanalyse fortgeführt sowie eine konzeptionelle Planung vorgenommen. Programmtechnische Arbeiten konnten jedoch noch nicht durchgeführt werden.
- AP3: Die Umsetzung von bereits existierenden Konzepten wurde fortgesetzt. Der Schwerpunkt lag bei der Realisierung
- der Lösungsverfahren für große Gleichungssysteme,
 - der Ergebnisausgabe in einem für die visuelle Darstellung geeigneten Format.
- AP4: Die ersten Verifizierungstests wurden konzipiert.
Die entwickelten Konzepte, die zugrunde liegenden Entscheidungen sowie der Projektfortschritt wurden dokumentiert.
- AP6: Der vorliegende Bericht wurde erstellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Schwerpunkt im nächsten Halbjahr ist das AP2.
Die Arbeiten zur Bereitstellung eines Rechengittergenerators werden fortgeführt.
Die Arbeiten zur Anbindung des Codes SobolHDMR werden fortgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11476A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 30.09.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.023.480,00 EUR	Projektleiter: Schneider	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Mit d³f und r³t 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 „d³f++“ integriert (A-DuR, H-DuR). Der Code d³f++ wurde bzw. wird in den Vorhaben WEIMAR, QUADER und SANTOS angewendet.

Das Vorhaben hat eine Anwendung des Grundwasserströmungs- und Transportcodes d³f++ 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 d³f++ 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 d³f++
- AP4: Projektleitung und Dokumentation

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.1: Äspö Task 9

Es wurde ein numerisches Modell einschließlich Borehole Disturbed Zone mit einem näherungsweise idealen Tracer zur Kalibrierung der transportrelevanten Eigenschaften der beiden Zonen erstellt. Die modellhafte Wiedergabe des gemessenen Tracerverlaufs gelingt, erfordert

jedoch eine außerordentlich kleine Tortuosität. Unter Verwendung der ermittelten Parameter wurde mit der Modellierung des Transports des leicht sorbierenden $^{22}\text{Na}^+$ -Tracers begonnen. Der Bericht über den Skin-Workshop im Mai 2016 in Prag ist soeben als GRS-Bericht erschienen (s. u.).

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

Die orientierenden Modellrechnungen an einem regionalen vertikalen 2D-Schnitt wurden mit Blick auf die Berücksichtigung der freien Grundwasseroberfläche in Kombination mit eindringendem Seewasser und Grundwasserneubildung fortgesetzt. Der Einbau der Vorfluter steht noch aus. Die Arbeiten wurden auf dem Topical Workshop zum SDM von SKB im Oktober diskutiert. Die Aufarbeitung von 3D-Daten zur Geländeoberfläche und zu den Störungszonen zu einer 3D-Modellgeometrie wurde begonnen.

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

Das Regionalmodell wurde in enger Anlehnung an die hydrogeologische Struktur des Modells von SURAO aufgebaut. Berücksichtigt werden bisher die freie Grundwasseroberfläche, Grundwasserneubildung und Vorfluter.

AP2.1: Eine weitere Testrechnung mit dem Speicherterm wurde durchgeführt.

AP4: Das fünfte Projektstatusgespräch fand am 16.11.2018 beim G-CSC in Frankfurt statt. Dabei wurde der aktuelle Stand der Arbeiten vorgestellt und die zeitliche Planung der weiteren Arbeiten aktualisiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1.1: Task 9: Fortsetzung der Arbeiten am Zwei-Zonen-Modell zur Erklärung der gemessenen Tracerprofile. Veröffentlichung des „Skin-Reports“ als GRS-504.

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

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

AP1.4: Explizite Integration der Haupt-Störungszonen in das Modell und Kalibrierung.

AP4: Das nächste Projektstatusgespräch soll im Mai 2019 stattfinden. Mit der Erstellung des Abschlussberichtes wird begonnen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Kröhn, K.-P. and Lanyon, B.: Observations of Hydraulic and Transport „Skin Effects“ SKB Task Force Workshop Prague 2016. FKZ 02 E 11476A (BMW), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-504, Köln, 2018.

Kröhn, K.-P.: Hydraulic Interaction of Engineered and Natural Barriers – Task 8b-8d, 8f of SKB Task Forces GWFTS and EBS. Report P-17-04, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Solna, 2018.

Kröhn, K.-P.: Hydraulic Interaction of Engineered and Natural Barriers – Task 8e of SKB. Summary report, FKZ 02 E 11213 (BMW), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-431, Köln, 2018.

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Theodor-W.-Adorno-Platz 1, 60323 Frankfurt am Main		Förderkennzeichen: 02 E 11476B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 595.088,00 EUR	Projektleiter: 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 Grundwasseroberfläche, 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 Grundwasseroberflächen (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

Die Parallelisierung des vollen Modells wurde entscheidend vorangebracht und die Testrechnungen auf bis zu 4096 Prozessen auf der WIPP-Geometrie sind vielversprechend. Einige technische Aspekte, wie das parallele Setzen komplexer Anfangsbedingungen mittels Rasterdateien mussten hierzu erarbeitet werden.

AP2: Erweiterung des Anwendungsbereichs von d^3f^{++}

Mit dem Ansatz von Coats-Smith wurde das immobile Porenwasser implementiert und der Anwendungsbereich von d^3f^{++} erweitert. Der Porenraum eines porösen Mediums enthält typischerweise nicht nur frei bewegliches (mobiles) Porenwasser, sondern auch immobiles Porenwasser, das sich in nicht durchgängig untereinander verbundenen Poren ("dead-end pores") befindet. Während das mobile Porenwasser auf hydraulischen Druck und Dichteänderungen mit der Ausbildung einer Strömung reagiert, die Schadstoffe transportieren kann, bleibt das immobile Porenwasser davon unbeeinflusst. Zur Modellierung dieses Sachverhalts wurde der Porenraum entsprechend dem Verhältnis von mobiler zu immobil Phase in zwei Anteile zerlegt und ebenso mit der Matrix (zum Zwecke der Sorption) verfahren. Für die beiden Phasen mobil/immobil, die in den ihnen zugeordneten Teilen des Porenraums leben, gibt es eigene Schadstoffkonzentrationen, wobei aber nur der Schadstoff in der mobilen Phase dem Transport durch die Strömung unterworfen ist. Zusätzlich ist zwischen den beiden Phasen ein lokaler Austausch durch Diffusion (proportional zur Differenz der lokalen Konzentrationen) vorgesehen. Sorption ist in beiden Phasen mit dem jeweils zugeordneten Anteil der Matrix möglich. Zur Qualifizierung der Implementierung wurde ein einfaches numerisches Experiment durchgeführt, bei dem ein poröses Medium zuerst mit schadstoffhaltigem und dann mit klarem Wasser durchspült wird. Die Ergebnisse liegen im Rahmen der Erwartungen.

AP3: Weiterentwicklung der Lösungsverfahren in d^3f^{++}

Das LIMEX-Verfahren wurde auf thermohaline Strömungen ausgedehnt. Kritischer Punkt dabei ist die Definition einer geeigneten Norm zur Bestimmung des Fehlers. An dieser Stelle wurde der für die halinen Strömungen bekannte Ansatz auf natürliche Weise verallgemeinert. Die gewählte Norm sichert also weiter eine Konvergenz der Darcy-Geschwindigkeit. Tests für den Parcel2D Testfall, bei dem ein Paket mit heißer Lauge aufgrund der thermischen Effekte aufsteigt, jedoch aufgrund der höheren Dichte absinkt, waren erfolgreich. In allen Fällen erwiesen sich Standard-Glättungsverfahren wie Block-Jacobi oder Block-Gauss-Seidel als robust.

Für die Entwicklung effizienter und stabiler Lösungsverfahren ist die detaillierte Untersuchung des Verlaufs der Lösungsprozesse wichtig. Dafür wurde in ug4 die Möglichkeit Zwischenzustände der Gitterfunktionen aus den Lösungsroutinen abzuspeichern wesentlich erweitert. In der neuen Implementierung werden die Gitterfunktionen zu verschiedenen Phasen von Zeitschritt- und Iterationsverfahren in eine Hierarchie der Unterverzeichnisse ausgegeben, so dass man zwischen verschiedenen Daten leicht unterscheiden kann. Außerdem wurde die früher fehlende Möglichkeit implementiert, Daten verschiedener Typen in dieser Ausgabe zu kombinieren. Das betrifft insbesondere die Hilfsdaten für die freie Oberfläche.

Die Gleichungen des Modells der dichtegetriebenen Strömung enthalten keine explizite Zeitableitung des Drucks. Stattdessen stellt die Druckgleichung eine Nebenbedingung dar. Innerhalb des Newton-Verfahrens ist es dennoch sehr wichtig, mit einer guten Anfangsnäherung für den Druck zu starten, da sonst die Konvergenz dieses nicht-linearen Löser langsam wird. Bei Problemstellungen mit der freien Oberfläche werden diese Schwierigkeiten sehr deutlich. Die Bewegung der freien Oberfläche in einem Zeitschritt verändert die Position des eingebetteten Randes. Das verletzt die Gültigkeit der durch das Ghost-Fluid-Verfahren gesetzten Randbedingungen auf diesem Rand, und damit die Qualität der alten Lösung als Anfangsnäherung für den Druck. Dafür wurde nach jedem Tracking-Schritt der freien Oberfläche eine Projektion des Drucks implementiert. Es wird die für den Druck lineare Massenerhaltung der gesamten flüssigen Phase mit der fixierten Konzentration gelöst.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden entsprechend der im Antrag angegebenen Vorgehensweise fortgesetzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11486A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 325.199,00 EUR	Projektleiter: 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 zweiten Halbjahr 2018 durchgeführt.
- AP3: Die FEP-Liste für die Betriebsphase wurde auf Basis der Konzepte aus den Vorhaben KONEKD und KOSINA für Endlager in Kristallingestein bzw. flachgelagerte Salzgesteine erweitert. Für das Teilsystem Schacht wurden die Einwirkungen von Innen (EVI) mit Hilfe der in BASEL erarbeiteten Vorgehensweise abgeleitet.
- AP4: Es wurden keine Arbeiten zu AP4 im zweiten Halbjahr 2018 durchgeführt.
- AP5: In einer umfassenden Analyse der FEP für die Nachverschlussphase wurden Maßnahmen in der Betriebsphase identifiziert, mit denen eine Reduzierung der Auswirkungen dieser FEP in der Nachverschlussphase möglich ist.
- AP7: Bereits fertige Ergebnisse wurden in den Abschlussbericht integriert. Ergebnisse aus BASEL wurden am 11.10.2018 auf dem Safety Case Symposium der OECD/NEA in Rotterdam präsentiert (siehe 5.). Es erfolgte ein Erfahrungsaustausch mit dem Vorhaben GEOSAF der IAEA.

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 ein weiterer Austausch mit dem Vorhaben GEOSAF geben (s. u.).
- AP2: Die noch verbleibenden Arbeiten in diesem AP werden auf Grund der angestrebten Verlängerung des Vorhabens BASEL in das Jahr 2020 verschoben.
- AP3 und 4: Ableitung der Einwirkungen von Innen (EVI) für die Komponenten „Grubenbaue und Richtstrecken“ sowie „Einlagerungsbereiche“.
- AP6: Die Arbeiten in diesem AP (Synthese aus den AP2 bis AP5, Vorschläge zum methodischen Vorgehen) werden auf Grund der angestrebten Verlängerung des Vorhabens BASEL in das Jahr 2020 verschoben.
- AP7: Es wird ein separater Bericht zu der Ableitung von EVI erstellt. Vorstellung der Ergebnisse auf der nächsten Sitzung (2nd Plenary Meeting) des Vorhabens GEOSAF im Sommer in Wien. Auf Grund der angestrebten Verlängerung des Vorhabens BASEL wird der Abschlussbericht zum Vorhaben BASEL erst im Jahr 2020 erstellt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Wolf, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Fahrenholz, C., Filbert, W., Lommerzheim, A., Noseck, U., Prignitz, S.: Investigation of the Impacts of the Operational Phase on Post-Closure Safety by a FEP Analysis. Integration Group for the Safety Case (IGSC) Symposium 2018: Current Understanding and Future Direction for the Geological Disposal of Radioactive Waste 10-11 October 2018, Rotterdam

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11486B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2016 bis 31.03.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 319.655,82 EUR	Projektleiter: Dr. Lommerzheim	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm umfasst die folgenden Arbeitspakete:

- AP1: Grundlagen (rechtlicher Rahmen, internationale Empfehlungen, Endlagerkonzepte)
- AP2: Grundzüge eines Sicherheitskonzepts für die Betriebsphase
- 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

- AP1: Es wurden Beschreibungen der Endlagerkonzepte und der Betriebsabläufe für flach lagernde Salzformationen (KOSINA) und Kristallin (KONEKD) erstellt.
- AP3: Die FEP-Liste für die Betriebsphase (umfasst z. Z. 169 FEP) wurde auf Basis der Konzepte aus den Vorhaben KONEKD und KOSINA für Endlager in Kristallingestein bzw. flachlagernden Salzformationen erweitert. Außerdem ergaben sich weitere FEP aus der systematischen Ableitung der Einwirkungen von Innen (EVI).
- AP5: Der FEP-Katalog für die Nachverschlussphase wurde diskutiert und im Hinblick auf Kristallin (CHRISTA) und flach lagerndes Salz (KOSINA) überarbeitet. Die Bewertung der Nachverschlussphase hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den sicheren Betrieb eines Endlagers wurde fortgeführt.
- AP6: Eine Methodik zur systematischen Ableitung von EVI aus der Verknüpfung von Komponenten und Prozesse wurde entwickelt und auf verschiedene Teilsysteme angewendet.
- AP7: Die Ergebnisse der bisherigen Arbeiten wurden in den Abschlussbericht integriert. Außerdem wurden die Ergebnisse des Vorhabens am 10./11.10.2018 auf dem NEA/IGSC Safety Case Symposium in Rotterdam präsentiert (siehe 5.).

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Es ist vorgesehen, die Ergebnisse des Vorhabens mit den Teilnehmern des internationalen GEOSAF-II-Projektes (IAEA) zu diskutieren.
- AP2: Das Sicherheits- und Nachweiskonzept wird detaillierter ausgeführt.
- AP3+4 (Bau und Betriebsphase):
Fortführung der systematischen Ableitung der Einwirkungen von innen (EVI) für die verschiedenen Teilsysteme der Endlagerkonzepte.
- AP7: Die Berichtserstellung zum Gesamtvorhaben BASEL wird fortgeführt.

Eine Aufstockung des Vorhabens BASEL ist beantragt, um die Methodik für die systematische Ableitung von EVI weiterzuentwickeln. Außerdem soll die Endlagerbeschreibung und die Ableitung der EVI auch auf die übertägigen Anlagen der betrachteten Endlagerkonzepte ausgedehnt werden. Maßnahmen zur Vermeidung oder Minimierung der Konsequenzen der EVI sollen darüber hinaus identifiziert und Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die Langzeitsicherheit bewertet werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Wolf, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Fahrenholz, C., Filbert, W., Lommerzheim, A., Noseck, U. & Prignitz, S.: Investigation on the Impacts of the Operational Phase on Post-Closure Safety by a FEP Analysis – NEA/IGSC Safety Case Symposium, 10.-11. October, Rotterdam

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11496A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2016 bis 30.04.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 786.134,00 EUR	Projektleiter: 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 Lösungen (Q3) wurden fortgesetzt. Die zeitliche Änderung des Korrosionspotentials wurde während der ersten 24 Stunden überwacht und anschließend an KIT zur weiteren Analyse der Oberfläche weitergeleitet. Die Proben haben einen deutlichen Korrosionsangriff bei den Experimenten bei 80 °C sowohl unter niedrigen als auch hohen Druckwerten gezeigt. Dieses Ergebnis ist in

Einklang mit dem erwarteten Verlust der Passivität, wie bereits von den potentiodynamischen Experimenten hingewiesen wurde.

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.

Versuche zur Untersuchung der kristallographischen Struktur des Stahls mittels Ätzen wurden eingeleitet. Dazu wurden drei unterschiedliche, für austenitische Stähle empfohlene Ätzlösungen (A 2V, Behara und Adler) verwendet. Da diese Experimente zum ersten Mal in unserem Labor durchgeführt wurden, benötigen diese einer weiteren Optimierung.

Erstellung eines Antrags zur Untersuchung des Korrosionsmechanismus mittels Synchrotron-Photoelektronenspektroskopie und Photoelektronen-Emissionsspektroskopie (PEEM) am Bessy II, Berlin Adlershof: in Kooperation mit der TU-Darmstadt und dem Helmholtz-Zentrum Berlin. Der Antrag wurde angenommen und die Arbeiten sind für eine Woche Messzeit im April 2019 angesetzt.

Koordination des Verbundvorhabens (AP4)

Projektmeeting zur Diskussion der Ergebnisse am 8. August 2018 an der GRS.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Bestimmung der Korrosionsprodukte und deren Oberflächenverteilung mittels Synchrotron XPS und PEEM
- Systematische Untersuchung der Korrosion von Stahl AISI 309S in künstlichen Porenwasser als Vorbereitung zu einer Kooperation im Projekt MaCoTe. Potentiodynamische Versuche mit anschließenden Oberflächenanalysen

5. Berichte, Veröffentlichungen

Corrosion of Austenitic Steel in Geochemical Near-Field Conditions of High-Level Radioactive Waste Rock Repositories, A.G. Muñoz, D. Schild, Proceeding of EUROCORR 2018, September 2018, Krakaw, Poland

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 E 11496B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2016 bis 30.04.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 475.748,00 EUR	Projektleiter: 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

AP1: Die in AP1 integrierte Postdoktorandenstelle konnte zum 10. Dezember besetzt werden (Frau Dr. Pelin Cakir). Der Aufbau für die elektrochemischen Untersuchungen der Stahlkor-

rosion bei Raumtemperatur und unter anoxischen Bedingungen hat begonnen. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Zelle, einer Referenzelektrode, einer Gegenelektrode und einer Arbeitselektrode (Stahloberfläche). Erste Vorversuche haben erfolgreich stattgefunden.

AP2: Es wurden Experimente zur Korrosion von zwei Stählen (CrNi- und C-Stahl), jeweils in 0.1 M NaCl oder MgCl₂, begonnen (6 Monate bei 90 °C unter anoxischen Bedingungen). Der Vergleich mit den Experimenten bei hoher Ionenstärke kann Informationen zum Effekt der Ionenstärke auf die Korrosionsprozesse liefern. Ein Schwerpunkt von AP2 ist die Analyse der korrodierten Stahlproben mit fokussiertem Beam an einer Synchrotron-Licht-Quelle (CrNi- und C-Stahl bei 90 °C für 6 Monate unter anoxischen Bedingungen in gesättigter NaCl- oder MgCl₂-Lösung korrodiert). Die analysierten Proben wurden eingebettet, querschnitten, poliert und mittels mikroskopischer und spektroskopischer Methoden im Labor vorcharakterisiert. An ausgewählten Stellen der Proben wurden (1) Informationen zur Elementverteilung an der Korrosionsfront mit Röntgenfluoreszenzanalyse generiert, und (2) Informationen zur chemischen Elementspeziation mit Röntgenabsorptionsspektroskopie gewonnen. Die detaillierte Auswertung der Messergebnisse dauert an. Erste Ergebnisse zeigen lokale Anreicherungen von Cr und Ni auf der Stahloberfläche für die in gesättigter NaCl korrodierten CrNi Stahlprobe.

Die Daten zur Titration von Magnetit wurden mit der FITEQL Software modelliert. Für eine genauere Modellierung der Eu-Sorptionsdaten bei höheren Ionenstärken wurde ein neues MUSIC-Modell in dem Code PhreeqC entwickelt.

Mit Hilfe quantenchemischer Rechnungen (DFT) wurde die Struktur von Grünem Rost GR(CO₃) bestimmt und der Einbau von Ln³⁺ und An³⁺ in diese Phase untersucht.

Ergebnisse zur Eu-Sorption und DFT Rechnungen wurden erfolgreich auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Korrosionsversuche mit elektrochemischen Methoden, z. B. die Aufnahme von Polarisationskurven oder zyklische Voltametrie. Die Analyse der korrodierten Proben mittels mikroskopischer und spektroskopischer Methoden kann Information zu den gebildeten Sekundärphasen und Änderungen der Oberflächenmorphologie liefern.

AP2: Korrosionsexperimente bei niedrigen Ionenstärken sollen abgeschlossen werden. Die experimentellen Daten der XAFS-Messungen mit fokussiertem Beam sollen ausgewertet werden. Die zurzeit laufenden Sorptionsversuche (Eu-Rückhaltung an Hibbingit bzw. Grünem Rost) sowie die Modellierung der Sorptionsdaten soll abgeschlossen werden. Weitere quantenchemische Rechnungen zielen auf die theoretische Untersuchung vom GR(Cl⁻) ab.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Zurzeit noch keine Veröffentlichungen aus dem Projekt. Ein Manuskript von Vozarova et al. („Sorption of Am(III) and Eu(III) onto magnetite under saline conditions: Batch adsorption, surface complexation modeling and EXAFS study“) ist in Vorbereitung

Vortrag N. Vozarova („Sorption of Eu(III) and Am(III) on magnetite in NaCl brines“) auf der Goldschmidt Konferenz (Boston, USA)

Vortrag R. Polly („Incorporation of radionuclides in green rust“) auf der ATAS 2018 Tagung (Nizza, F)

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11527
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2017 bis 30.11.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 513.184,92 EUR	Projektleiter: 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 den Ergebnisbericht des Projektpartners BAM zum AP1 (Nationaler und internationaler Stand zu Behälterkonzepten und -anforderungen) kommentiert und in Gesprächen diskutiert.

Den Bericht zum AP2 "Ermittlung der behälterrelevanten Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein in Deutschland" hat BGE TECHNOLOGY im Berichtszeitraum mit dem Projektpartner BAM abgestimmt und abgeschlossen. Dabei wurden insbesondere die Beanspruchungsgrößen für die Behälter in dem ausgewählten Endlagerkonzept im jeweiligen Wirtsgestein detailliert erörtert.

Zum AP3 "Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein" wurde die entwickelte Methode zur systematischen Herleitung von Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager weiter angewendet. Unter Berücksichtigung der drei betrachteten Wirtsgesteine, der entsprechenden Einlagerungskonzepte und jeweiligen Sicherheits- und Nachweiskonzepte wurden die Anforderungen soweit wie möglich konkretisiert. Diese Arbeiten wurden planmäßig weitergeführt und Anforderungen für die ausgewählten Einlagerungskonzepte im jeweiligen Wirtsgestein weiter spezifiziert. Die dabei erzielten Zwischenergebnisse wurden mit dem Partner BAM ausgetauscht und intensiv diskutiert.

In regelmäßigen Projektgesprächen (9.8. und 4.10.2018) sowie in einer Telefonkonferenz (16.11.2018) wurde der Arbeitsfortschritt mit dem Partner BAM ausgetauscht, diskutiert und das weitere Vorgehen abgestimmt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im kommenden Berichtszeitraum wird der Arbeitsschwerpunkt für BGE TECHNOLOGY GmbH darin bestehen, die Arbeiten zum AP3 zur Herleitung und Quantifizierung von Behälteranforderungen zu vervollständigen, die Ergebnisse mit dem Partner BAM weiter im Detail abzustimmen und den Berichtsentwurf dazu anzufertigen.

Für den Synthesebericht (AP5) werden im nächsten Halbjahr die Struktur, der Inhalt und der Umfang in Abstimmung mit dem Partner BAM festgelegt und mit der Dokumentation der Ergebnisse begonnen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Die bisherigen Ergebnisse des Projektes wurden dem internationalen Fachpublikum auf dem 8. Exchangeforum der IGD-TP (Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform) am 3. und 4. Dezember 2018 mit einem Posterbeitrag (Entwurf von BAM) vorgestellt

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin		Förderkennzeichen: 02 E 11537
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBra), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2017 bis 30.11.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 188.990,00 EUR	Projektleiter: 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

Nach Abschluss der Dokumentensammlung wurde der Ergebnisbericht zum AP1 als Entwurf fertiggestellt und an den Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY übersendet. Der Ergebnisbericht enthält neben grundlegenden Informationen zum Arbeitspaket selbst eine umfassende und aktuelle Darstellung der internationalen Situation im Bereich der Endlager- und Behälterforschung in verschiedenen Wirtsgesteinen. Relevante Informationen zu 35 verschiedenen Ländern (hinsichtlich Kernenergienutzung, Entsorgungsprogramm und -politik, Geologie und Behälterkonzepten) sind in sog. „Fact Sheets“ dargestellt. Für 11 fortgeschrittene Programme (Belgien, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Republik Korea, Schweden/Finnland, Schweiz, Tschechische Republik und Vereinigte Staaten von Amerika) sind nach Wirtsgestein geordnete detaillierte Darstellungen der Behälteranforderungen, -konzepte und -entwicklungen erarbeitet worden. Derzeit wird der Berichtsentwurf überarbeitet und finalisiert.

AP5: Dokumentation und Abschlussbericht

In regelmäßigen Projektgesprächen mit dem Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY (vormals DBE TECHNOLOGY) wurden der Projektfortschritt vorgestellt und die weiteren Arbeitsschritte diskutiert und vereinbart. Die bisherigen Ergebnisse des Projektes wurden dem internationalen Fachpublikum auf dem 8. Austauschforum der IGD-TP (*Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform*) am 3. und 4. Dezember 2018 mit einem Posterbeitrag vorgestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Die Revision des Ergebnisberichtes zum AP1 wird im Zusammenwirken mit der BGE TECHNOLOGY zeitnah abgeschlossen. In Vorbereitung des AP4 werden die Informationen zum Themenbereich „Materialkorrosion“ systematisch ausgewertet.

AP3: Auf der Grundlage der in AP1 gewonnenen Informationen werden eine internationale Zusammenstellung von Kategorien für Behälteranforderungen sowie ein Arbeitspapier zur Quellenlage bzgl. Mikroben im Salzstein erstellt. Im Rahmen des von der BAM durchzuführenden AP3.4 werden ergänzend zu den vom Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY im AP3 durchgeführten Arbeiten zu nationalen Vorgaben und Richtlinien sowie unter Verwendung der im AP1 erarbeiteten internationalen Lösungsansätze die schutzzielorientierten Behälteranforderungen abgeleitet.

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 finalisiert. Zu jedem der Arbeitspakete 2 bis 4 soll ebenfalls ein Ergebnisbericht verfertigt werden sowie ein Abschlussbericht für das Gesamtvorhaben.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg		Förderkennzeichen: 02 E 11547A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2017 bis 30.04.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 448.984,00 EUR	Projektleiter: Dr. Brohmann	

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 bestand darin, unterschiedliche Perspektiven zu soziotechnischen Herausforderungen im deutschen Endlagerkontext zu erfassen. Die Auswertung der arbeitsteilig durchgeführten Leitfaden-Interviews wurde zusammen mit den Ergebnissen aus der Literaturanalyse und den Erkenntnissen aus dem transdisziplinären Workshop „Das Soziotechnische in der Endlagerung“ (27.02.2018) im AP1-Bericht vom 25.09.2018 zusammengeführt und dort ausführlich diskutiert.

AP3: Auf der Basis einer Literaturlauswertung wurden in AP3 bestehende Konzepte und Erfahrungen mit reversiblen Prozessen vertieft betrachtet und in den Kontext des im StandAG

skizzierten selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens und der vorgesehenen partizipativen Einbindung der Öffentlichkeit gestellt.

AP3.1 + AP3.2: In die Analyse von Konzepten und Ansätzen reversibler Entscheidungsprozesse wurden Perspektiven der Öffentlichkeitsbeteiligung einbezogen.

Es wurden Recherchen zu den beiden zentralen Aspekten „Expertenstreit“ und „Organisationsentwicklung“ u. a. in Bezug auf deren Bedeutung in einem reversiblen Verfahren vertieft. Sowohl die Literaturquellen als auch die empirischen Beispiele verschiedener Endlager-Verfahren wurden im Hinblick auf Erfordernisse von Reversibilität sowie die Gestaltung von Entscheidungsprozessen ausgewertet. Insbesondere aus Sicht lernender Prozesse ergeben sich Anforderungen an eine geeignete Struktur der Beteiligung sowie an die beteiligten und beteiligenden Akteure, Entscheider wie auch Stakeholder. Aus der Perspektive der Öffentlichkeit ergeben sich Erwartungen an den Prozess und die beteiligten Institutionen.

Am 09.10.2018 wurde ein Projekttreffen zum gegenseitigen Kennenlernen und zur Vorstellung des aktuellen Standes mit Herrn Bittdorf (PTKA) in Karlsruhe durchgeführt.

Es fanden im Berichtszeitraum insgesamt drei Projektgespräche der Verbundpartner statt (zwei Telefonkonferenzen und ein Treffen) sowie zusätzlich zwei themenbezogene Telefonkonferenzen (jeweils FFU und Öko sowie FFU und ITAS). Schwerpunkte der Abstimmung waren vor allem: Abschluss der Arbeiten im AP1, Fortführung und Fokussierung der Arbeiten in den AP2, 3 und 4 sowie der inhaltlichen Schnittstellen zwischen den AP, Absprachen über gemeinsame Publikationen sowie die Planung des internationalen Workshops 2019 (WS2).

4. Geplante Weiterarbeiten

In den nächsten sechs Monaten sind folgende Aktivitäten geplant:

AP3.1 + 3.2:

Systematische Dokumentation und Zusammenfassung der Ergebnisse, insbesondere der Auswertung von Fallbeispielen zu Expertendilemmata in partizipativen Verfahren und in öffentlichkeitsrelevanten Kontexten

AP3.3:

Reflexion und Zusammenführung von Schlussfolgerungen aus AP3.1 und 3.2 zur Vorbereitung von Handlungsempfehlungen

Vorbereitung und Durchführung des AP übergreifenden Workshops (WS2) zur Präsentation und Reflexion erster Ergebnisse

Unterstützung der Vorlesungsreihe „Offener Hörsaal“ an der FU Berlin (u. a. Moderation und Absprache der Konzeption)

5. Berichte, Veröffentlichungen

Beate Kallenbach-Herbert: Impuls Forum 3 „Selbsthinterfragendes und lernendes Verfahren“ auf der Statuskonferenz „Endlagerung“ des BfE am 8. November 2018

Beim Deutsch-Russischen NO.RWM-Seminar „Society and Radioactive Waste“ in Tomsk, Russland, wurde von Beate Kallenbach-Herbert ein inhaltlicher Impuls gegeben

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 E 11547B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2017 bis 30.04.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 399.013,00 EUR	Projektleiter: 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: In Kooperation mit den Projektpartnern wurde der AP1-Bericht fertiggestellt (25.9.2018, 93 Seiten) und an den Projektträger übermittelt. Die sehr unterschiedlichen Perspektiven verschiedener wichtiger Akteure in nuklearen Entsorgung wurden dabei zusammen mit den Ergebnissen aus der Literaturanalyse und den Erkenntnissen aus dem transdisziplinären Workshop „Das Soziotechnische in der Endlagerung“ (Feb. 2018) dargestellt. Der Bericht leistet weiterhin eine intensive Beschäftigung mit den Konzepten „soziotechnische Ensembles“ und „soziotechnische Regime“, die in den weiteren APs als Analyseinstrumente genutzt werden. Vertieft wurde auch die

Betrachtung des Endlagers als Großinfrastrukturprojekt (Hocke/Brunnengräber 2019/i.E.).

- AP4.1: Ein erster Entwurf für den Bericht über bestehende Konzepte für und Erfahrungen mit Long-term Governance wurde erstellt. Zu diesem Zweck wurde Literatur aus den Themenfeldern Schienenverkehr, Staudämme, Climate Engineering und Kohlebergbau ausgewertet. Die dort beschriebenen Konzepte werden im Bericht auf ihre Übertragbarkeit auf den Fall der Endlagerung diskutiert. Verfassen eines Journalbeitrags zu Grundlagen der Long-term Governance.
- AP4.2: Eine weitere Präzisierung der Konzeption der Empirie (Interviews und Fokusgruppen) wurde durchgeführt. Weiterhin fand eine Auswahl der ersten Interviewpartner statt und es wurden Themen für den Interviewleitfaden festgelegt.

Es wurden insgesamt drei Projektgespräche der Verbundpartner durchgeführt (eine Telefonkonferenz, 4.9.2018 sowie zwei Treffen am ITAS, 9.10.2018 mit Teilnahme des Projektträgers, und 6.11.2018). Schwerpunkte der Diskussion und Abstimmung waren: Abschluss der Arbeiten am AP1, Fortführung und Diskussion der Arbeiten an den AP2, 3, 4 sowie der Schnittstellen zwischen den AP, Planung des Internationalen Workshops 2019.

Bei dem Deutsch-Russischen NO.RWM-Seminar „Society and Radioactive Waste“ in Tomsk, Russland, wurde ein Vortrag gehalten über „Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“.

4. Geplante Weiterarbeiten

In den nächsten sechs Monaten sind folgende Aktivitäten geplant:

- AP4: Ausarbeitung der Literaturübersicht zu Arbeitspraktiken in ausgewählten Themenfeldern
Durchführung von Interviews
Vorbereitung der Fokusgruppen

Sonstiges: Vorbereitung und Durchführung des zweiten Projektworkshops in Kooperation mit den Projektpartnern.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Kuppler, S.; Hocke, P.: The Role of Long-term Planning in Nuclear Waste Governance. *Journal of Risk Research* (2018), DOI: 10.1080/13669877.2018.1459791.

Kuppler, S.; Mbah, M.: Governing Energy Landscapes: The need for a long-term, place-sensitive perspective. Vortrag bei UFZ EnergyDays 2018 "Energy Landscapes of Today and Tomorrow", Leipzig, 25.9.2018.

Hocke, P.: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. Vortrag auf dem Deutsch-Russischen NO.RWM-Seminar „Society and Radioactive Waste“, Tomsk, Russland, 19.10.2018.

Hocke, P.; Kuppler, S.; Mbah, M.: Politischer Lernprozess oder naives Hoffen auf positive Effekte zukünftiger Bürgerbeteiligung? Das neue Standortauswahlverfahren bei der Entsorgung hochradioaktiver Brennstoffe. Vortrag auf der 8. internationalen Konferenz des Netzwerks Technikfolgenabschätzung (NTA) „Gesellschaftliche Transformationen: Gegenstand oder Aufgabe der Technikfolgenabschätzung?“, Karlsruhe, 7.11.2018.

Zuwendungsempfänger: Freie Universität Berlin, Kaiserwerther Str. 16-18, 14195 Berlin	Förderkennzeichen: 02 E 11547C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt C	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2017 bis 30.04.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 383.625,00 EUR	Projektleiter: 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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Ein Teilziel des AP1 besteht darin, unterschiedliche Perspektiven zu soziotechnischen Herausforderungen im deutschen Endlagerkontext zu erfassen. Die Interviewauswertung wurde zusammen mit den Ergebnissen aus der Literaturanalyse und den Erkenntnissen aus dem transdisziplinären Workshop „Das Soziotechnische in der Endlagerung“ (27.02.2018) im AP1-Bericht vom 25.09.2018 (93 Seiten) zusammengeführt.

Es erfolgte eine intensive Beschäftigung mit den Konzepten „soziotechnische Ensembles“ und „soziotechnische Regime“, die in den weiteren AP als Analyseinstrumente genutzt werden. Vertieft wurde auch die Betrachtung des Endlagers als Großinfrastrukturprojekt (“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”, Brunnengräber/Hocke 2019).

Am 09.10.2018 fand ein Projekttreffen zum gemeinsamen Kennenlernen und zur Vorstellung des aktuellen Standes mit Herrn Bittdorf (PTKA) in Karlsruhe statt. Es wurden insgesamt drei Projektge-

sprache der Verbundpartner durchgeführt (zwei Telefonkonferenzen und ein Treffen) sowie zusätzlich zwei themenbezogene Telefonkonferenzen (jeweils FFU und Öko sowie FFU und ITAS).

AP2.1:

- Die vielfältigen Schwierigkeiten (wicked problem) im Umgang mit den hochradioaktiven Abfällen, die sich insbesondere aus den komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Sozialen und dem Technischen ergeben, wurden anhand von 10 Charakteristika systematisch dargestellt (“The wicked problem of long term radioactive waste management. Ten characteristics of a complex technical and societal challenge”, Brunnengräber 2019).
- Sondierung und Auswertung der Literatur zur Frage der Übertragbarkeit von Erkenntnissen zu sozio-technischen Herausforderungen aus anderen Großprojekten (social analogues). Betrachtet wurden Fracking, Windenergie und Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS). Die Auswertung erfolgte anhand eines spezifischen Kriterienkatalogs („Soziotechnische Analogie als Erfahrungshintergrund für ein Endlager“, Themann/Brunnengräber 2019).
- Sondierung und Auswertung der Literatur zu den Konzepten der Pfadabhängigkeiten/-entwicklungen sowie analytische Übertragung auf das Themenfeld der Endlagerung. Der Fokus lag dabei zum einen auf den Pfadentwicklungen im Kontext der Auswahl der technologischen Endlageroptionen und deren Wechselwirkungen mit den soziopolitischen Rahmenbedingungen. Zum anderen wurde das Konzept der Pfadabhängigkeiten auf das Feld der Institutionen und des Institutionenhandelns angewandt sowie die zu erwartende Erklärungskraft für die Analyse der Interdependenzen zwischen Pfadabhängigkeiten und Regulierung eruiert („Pfadabhängigkeiten in der Endlagerpolitik“, Isidoro Losada 2019).
- Übertragung des Konzeptes „science policy interfaces“ auf das Themenfeld der Endlagerung. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Endlager-Kommissionen im bundesdeutschen Kontext analysiert, um die Rolle solcher Expert*innengremien hinsichtlich ihrer politischen Bedeutung und Einflussmöglichkeiten anhand eines spezifischen Kriterienkatalogs bewertet (“Experts, politics and society in the German site selection process. Ambition and reality of the advisory bodies” Isidoro Losada/Themann/Di Nucci 2019).

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2.2: Fertigstellung eines Beitrags über formelle u. informelle Beziehungen bei der Regulierung.
- AP2.2: Fertigstellung eines Beitrags über Wissenschafts- und Expertendissense innerhalb der politischen Aushandlungsprozesse um Fracking und CCS und deren Übertragung und Erkenntnisse für das Endlagerungsthemenfeld.
- AP2.3: Fertigstellung eines Beitrags zu der Richtlinie 2011/70/Euratom und der Analyse der internationalen Wechselwirkungen, die sich aus internationalen Regulierungsmaßnahmen ergeben.
- AP1: Verfassen eines Arbeitspapiers „Der socio-technical Divide – Zur unterschiedlichen Interpretation und Nutzung von zentralen Begriffen des Endlagerdiskurses“ (Arbeitstitel).

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)

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		Förderkennzeichen: 02 E 11557
Vorhabensbezeichnung: Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GESAV II)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Felder 3.2 + 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2017 bis 31.12.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 919.894,00 EUR	Projektleiter: 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 statisch-dynamische Einbringversuch wurde in der 38. und 39. KW planmäßig durchgeführt.
Dem Versuch vorangegangen waren intensive technologische Abstimmungen mit der GSES mbH. Der statische Teil des Einbringens wurde durch ein mit einem Schiebeschild ausgerüsteten Beraubfahrzeug realisiert. Die dynamische Verdichtung wurde durch eine flachbauende Anbaurüttelplatte erreicht. Die Anwendung der beschriebenen technologischen Kombination hat einen planmäßigen Versatzeinbau ermöglicht. Die erreichte Einbaudichte ist die bislang höchste. Ein durchgängiger Firstanschluss konnte nicht komplett erzielt werden.
Die Beschaffung geeigneter Technik zur Optimierung des Schleuderversatzverfahrens mit namhaften Industriepartnern steht aus. Es werden Alternativen geprüft, um die avisierte Maschinenteknik zu testen.
Die Optimierung des Blasversatzverfahrens wird im Labormaßstab weiter durchgeführt. Es wurde ein Versuchsstand zur Untersuchung druckluftbedingter Einwirkungen des Blasversatzverfahrens auf GESAV-Material entwickelt.
- AP8: Kontinuierliche messtechnische Überwachung des bestehenden Versatzkörpers erfolgt weiterhin. Die Polyhalitbildung wurde in situ nachgewiesen. Im dritten Versatzkörper (stat.-dyn.) konnten bereits die Zwischenphasen nachgewiesen werden. Die gemessene maximale Setzung beträgt je nach Versatzverfahren 0,6 % (Blasversatz); 1,8 % (Schleuderversatz) bzw. 0,3 % (stat.-dyn.). Die Setzung war nach 1250 h (Blasversatz); 200 h (Schleuderversatz) bzw. 90 h (stat.-dyn.) abgeschlossen.
Durchströmungsversuche zur Ermittlung der integralen Permeabilität wurden durchgeführt. Der prototypische Charakter der Versuchseinrichtung machte Anpassungen am Versuchsaufbau notwendig.
- AP9: Technische Vorbereitungen zur Probenahme wurden in Abstimmung mit GSES und IfG getroffen. Die Gewinnung von Proben für gesteinsmechanische Laboruntersuchungen am IfG wurde aufgrund der andauernden Durchströmungsversuche zurückgestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP7: Entwicklung von Versatzverfahrenskombinationen zum Ausnutzen der bei den bisherigen Versuchen gezeigten spezifischen Verfahrensvorteile.
Durchführung von Laborversuchen am neuen Blasversatzversuchsstand für abschließende Aussagen zum Blasversatzverfahren.
- AP8: Die Beprobung der Kernbereiche der Versatzkörper ist für 05/2019 terminiert.
- AP9: Nachuntersuchungen des Versatzkörpers beginnen sobald die Probenahme erfolgt ist. Die Untersuchung der während der Einbringversuche für die ersten beiden Verfahren erstellten Rückstellproben beginnt 02/2019,

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Clausthal, Adolf-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		Förderkennzeichen: 02 E 11567A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH ² M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1 + 4.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2017 bis 31.07.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 517.360,00 EUR	Projektleiter: 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 TH²M-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

Mit Blick auf organisatorische Arbeiten der TUC als Projektkoordinator hat in diesem Berichtszeitraum ein zusammen mit dem Gastgeber organisiertes projektinternes Fachtreffen sowie eine Telefonkonferenz stattgefunden. Zudem ist das Projekt auf dem TOUGH-Symposium in Berkeley erstmals der Fachöffentlichkeit vorgestellt worden. Dazu hat die TUC federführend unter Mithilfe der übrigen Partner neben der „erweiterten Kurzfassung“ (Referenz s. u.) ein Präsentationsposter zusammengestellt, das eine generelle Vorstellung des Projekts zusammen mit ersten Simulationsergebnissen zeigt. Intern sind weitere Abstimmungen, Anpassungen und Vorlagen zu den Modellen 1.4 und 1.5 durchgeführt bzw. erstellt sowie weitere Ergebnisse der Partner zu den Modellen 1.1 und 1.4 gegenübergestellt worden.

Der im vorherigen Berichtszeitraum identifizierte Fehler im FLAC3D-TOUGH2-Kopplungs-(FTK-)Simulator bei der Simulation eines Materials mit kompressiblem Korngerüst (Biot-Koeffizient $\alpha < 1$, einstellbar in FLAC3D) konnte erfolgreich behoben werden, indem eine geeignete Übertragung dieser Materialeigenschaft auf TOUGH2 erarbeitet worden ist. Nach der Vorstellung von Variationsvorschlägen für Modell 1.5 und gemeinsamer Diskussion auf dem Fachtreffen sind von der TUC Modifikationen an den Vorschlägen und damit einhergehend weitere Parameterrecherchen und Neuberechnungen vorgenommen worden. Auch die neuen Simulationsergebnisse zu Modell 1.5 erscheinen plausibel.

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse der Partner zu Modell 1.4 ist augenfällig, dass die Streubreiten im Vergleich zu Modell 1.1, wo umfangreichere analytische Lösungen vorgelegen haben, größer sind. Insbesondere die Kurven der mechanischen Zustandsgrößen besitzen oftmals signifikante Unterschiede zueinander. Als Hilfestellung bei der Ergründung dieser Unterschiede sind von der TUC Vergleichsberechnungen mit an die Partner angeglichenen Diskretisierungen und Einstellungen durchgeführt und im Rahmen der Telefonkonferenz vorgestellt worden, die zum Teil auch erfolgreich helfen konnten.

4. Geplante Weiterarbeiten

Parallel zur Sammlung und Gegenüberstellung der noch fehlenden bzw. ggf. noch zu überarbeitenden Ergebnisse der Partner für die bisherigen Modelle ist die Erstellung einer Excel-Tabellenkalkulationsvorlage für Modell 1.5 zu erstellen sowie die Erarbeitung von ersten konkreten Berechnungsvariationen zu Stufe 2 und deren Vorausberechnungen durch die TUC anzugehen. Dazu ist eine entsprechende Weiterentwicklung des FTK-Simulators vorzunehmen.

Es ist beabsichtigt, die bisherigen Ergebnisse zu den Arbeiten der TUC für Stufe 1 zeitnah dokumentarisch für die Erstellung des Abschlussberichts festzuhalten.

Für die nähere Zukunft ist auch eine weitere, etwas tiefergehende Vorstellung des BenVaSim-Projekts für die Fachöffentlichkeit geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Rutenberg, M.; Feierabend, J.; Lux, K.-H.; Maßmann, J.; Lorenzo Sentís, M.; Graupner, B.J.; Hansmann, J.; Czaikowski, O.; Wiczorek, K.; Friedenber, L.; Hotzel, S.; Kock, I.; Rutqvist, J.; Hu, M.; Rinaldi, A.P. (2018): BenVaSim - A benchmarking of simulators for modeling TH²M processes in the context of radioactive waste disposal. Sammlung der erweiterten Kurzfassungen (extended abstracts) zum 6. TOUGH-Symposium, LBNL, 8.-10. Oktober 2018, Berkeley, Kalifornien, USA

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11567B	
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH ² M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt B			
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1			
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2017 bis 30.04.2020		Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 750.803,00 EUR		Projektleiter: 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 hat ein Projektgespräch im Anschluss an das TOUGH-Symposium in Berkeley am 11. Oktober 2018 stattgefunden. Zudem wurde am 17. Dezember eine Telefonkonferenz abgehalten. Die Projektpartner präsentierten und diskutierten die erzielten Ergebnisse zu Model 1.1 sowie die fortgeschrittenen Ergebnisse zu Model 1.4. Zudem wurden die ersten Ansätze für das neue Model 1.5 vorgestellt und diskutiert. Auch bei Model 1.4 bestehen aus Sicht der GRS weiterhin Schwierigkeiten bei der Umsetzung des vereinfachten Ansatzes, welcher eine Aufsättigung des Modells mit Vernachlässigung gekoppelter Prozesse vorsieht.

Während bei Model 1.1 die Ergebnisse trotz Schwierigkeiten, welche durch die Vorgabe einer Teilsättigung im Model mit Vernachlässigung der Saugspannung entstehen, durch eine sehr flache lineare Retentionskurve angenähert werden können, eignet sich dieser Ansatz für das Model 1.4 nicht. Aufgrund der Schwierigkeiten des von der GRS eingesetzten Simulators CODE_BRIGTH mit dem abstrahierten Ansatz, wurden von der GRS für das Model 1.4 nur die Szenarien mit Berücksichtigung der gekoppelten Prozesse bearbeitet.

Bei der Ergebnisdiskussion kristallisierte sich heraus, dass die eingesetzten Simulatoren verschiedene Ansätze zur Berechnung der effektiven Spannungen verfolgen, welche zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Mechanik führen. Aus Sicht der GRS besteht zu diesem Thema tiefergehender Diskussionsbedarf, dem im weiteren Verlauf des Projekts nachgegangen wird. Zudem wird weiterhin angestrebt, parallel zum Fortschritt des Projekts der Fragestellung der Vernachlässigung von gekoppelten Prozessen 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

Michael Rutenberg, Jörg Feierabend, Karl-Heinz Lux, Jobst Maßmann, Manuel Lorenzo Sentís, Bastian J. Graupner, Jürgen Hansmann, Oliver Czaikowski, Klaus Wiczorek, Larissa Friedenberg, Stephan Hotzel, Ingo Kock, Jonny Rutqvist, Mengsu Hu, Antonio P. Rinaldi: BenVaSim – A Benchmarking of Simulators for Modeling TH2M Processes in the context of radioactive waste disposal. TOUGH Symposium 2018, Berkeley, Oktober 2018

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine	Förderkennzeichen: 02 E 11577A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Felder 3.1 + 3.2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2017 bis 31.05.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 793.425,00 EUR	Projektleiter: 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 Verschlussystems zu untersuchen. Im Berichtszeitraum wurden die in der ersten Jahreshälfte begonnenen TOUGH2-3D-Modellrechnungen zum Druckaufbau und Sättigungsverhalten der Dichtelemente im Verschlussystem abgeschlossen und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass wasserführende Klüfte im Bereich der geotechnischen Barriere benötigt werden, um eine komplette Wassersättigung und somit vollständige Quellung der Bentonit-Dichtelemente im Verschlussystem zu ermöglichen. Aus den TOUGH2-3D-Modellierungen wurden zudem die auf die Barrieren wirkenden Lastannahmen abgeleitet und am Beispiel eines Streckenverschlusses mit der vorgesehenen ingenieurtechnischen Vorbemessung des in URSEL erarbeiteten Verschlusskonzeptes begonnen.
- AP3: Ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt in SUSE ist der Aufbau eines 3D-Transportmodells, das wesentliche struktureologische Merkmale, insbesondere Klüfte, berücksichtigt. Allerdings bestand unter den Projektbeteiligten bisher noch kein Konsens, wie die struktureologischen Informationen aus den sog. DFN-Modellen in ein numerisches Modell überführt werden können. Insbesondere im Kristallin besteht die Problematik oftmals darin, dass struktureologische Informationen, insbesondere Klüfte, nur in abstrahierter bzw. vereinfachter Form im numerischen Modell dargestellt werden können. Im Berichtszeitraum wurden daher Modellierungstechniken gesichtet und diskutiert, mit der die struktureologischen Modellvorstellungen in ein numerisches Modell überführt werden können. Als erfolgversprechend wird ein Ansatz angesehen, bei dem die struktureologischen Informationen aus den DFN-Modellen auf ein Kontinuumsmodell mit äquivalenten, d. h. klufftypischen hydraulischen Eigenschaften übertragen werden (equivalent porous media, EPM). Die Projektbeteiligten haben sich darauf verständigt, diesen Ansatz zu verfolgen und numerische Untersuchungen zur Überprüfung des Modellansatzes vorzunehmen.
- AP5: Als Grundlage für großräumige Modellierungen zur Abbildung des Strömungsfeldes und der Radionuklid Ausbreitung 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. Die zunächst durchgeführten Testrechnungen mit dem Diskontinuumscode 3DEC haben gezeigt, dass Nachteile bei der Lösung der vereinbarten Benchmark-Berechnungen bestehen. Aus diesem Grunde wird eine Lösung der Testfälle mit dem Kontinuumscode FLAC3D und bei späterer Simulation von realistischen Trennflächengefügen über die in AP3 vorgestellten EPM-Ansatz angestrebt. Die beiden ersten Benchmark-Versuche konnten in der Berichtsphase erfolgreich abgeschlossen werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Durchführung einer ingenieurtechnischen Vorbemessung des Verschlusskonzeptes
- AP3: Ableitung von EPM-Modellen aus den DFN-Modellen zur Vertiefung des Systemverständnisses bzw. zur Überprüfung des Modellansatzes (Validierung und hydraulische Parametrisierung)
- AP5: Weiterführung der Benchmark-Modellierungen mit FLAC3D

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11577B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2017 bis 31.05.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 882.900,00 EUR	Projektleiter: 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 Störungszonnennetzwerkes präzisiert. Auf dieser Grundlage werden mit den Programmen d^{3f++} 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 Störungszonnennetzwerkes 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 23.08.2018 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 14.12.2018 bei der GRS gGmbH in Braunschweig mit Beteiligung der DBE Technology statt.

Vom 14.-17.08.2018 hat GRS an einem Workshop der Russischen Tonmineralogiegruppe in Moskau mit einem Vortrag über die laufenden Bentonit-Untersuchungen an der GRS teilgenommen. Bei dem Workshop wurde von russischen Kollegen u. a. über Experimente zu Sorption an Gneis-Proben vom Standort Yenisejsky berichtet und die Ergebnisse diskutiert.

AP3: Das weitere Vorgehen bezüglich der Ableitung kontinuumsmechanischer Modelle aus den stochastischen DFN-Modellen wurde gemeinsam mit BGE TECHNOLOGY festgelegt. Der verfolgte Ansatz beinhaltet in einem ersten Schritt die hydraulische Parametrisierung von einfachen, kleinskaligen Modellen (Würfel mit Einzelkluft) und in einem zweiten Schritt die Validierung des Ansatzes durch einen Vergleich der Ergebnisse von Modellrechnungen mit den Programmen FLAC3D (BGE TECHNOLOGY) und d³f++.

AP4: Das BET-Gerät wurde im August geliefert und in Betrieb genommen. Da entsprechend der Literatur eine Übertragbarkeit der K_a -Werte aus Laboruntersuchungen auf das unverritzte Kristallingestein erst ab einer Korngröße von 1 mm gegeben sein kann, wurde die Anwendung der BET-Methode zur Untersuchung einer auf 1-2 mm zerkleinerten Kristallinprobe getestet. Für diese Probe wurde eine BET-Oberfläche von $0,2923 \pm 0,0025 \text{ m}^2/\text{g}$ gemessen. Dieser vergleichsweise niedrige Wert rechtfertigt die Anschaffung des BET-Messgeräts, das mit Krypton als adsorbierendem Gas arbeitet, da die BET-Messgeräte, in denen N_2 als adsorbierendes Gas eingesetzt wird, eine absolute Probenmindestoberfläche von $\sim 0,5 - 1 \text{ m}^2$ erfordern.

AP5: Die Modellrechnungen zur regionalen Grundwasserströmung und zum Schadstofftransport wurden anhand eines Matrixmodells fortgeführt. In Absprache mit den russischen Kollegen wurden Modellvariationen für verschiedene räumliche Realisierungen der Kluft- und Störungszonen und für unterschiedliche Matrixpermeabilitäten durchgeführt und dabei der Transport eines inerten Tracers und eines sorbierenden Stoffes simuliert. Grundsätzliche Aussagen bezüglich des Einflusses der Vernetzung der Störungszonen und der Auswirkungen der unterschiedlichen Matrixpermeabilität auf die Strömung und den Transport konnten aus den Ergebnissen abgeleitet werden. Derzeit werden die Ergebnisse der Modellierung für das regionale Modell mit denen der russischen Partner verglichen und diskutiert. Grundlagen der weiterführenden Modellrechnungen werden in enger Absprache mit den Partnern festgelegt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3: Aufbau und Parametrisierung der Modelle zur Ableitung kontinuumsmechanischer Modelle aus stochastischen DFN-Modellen, Durchführung erster Rechnungen.

AP4: Die Sorptionsexperimente werden begonnen, sobald die neu beschaffte Glovebox zur Benutzung zur Verfügung steht.

AP5: Die Ergebnisse der Strömungs- und Transportrechnungen werden mit den russischen Partnern verglichen und diskutiert. Das weitere Vorgehen wird gemeinsam mit den russischen und den deutschen Partnern festgelegt. Die Durchführung weiterer Rechnungen ist geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe		Förderkennzeichen: 02 E 11587A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2017 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 989.049,00 EUR	Projektleiter: 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: Die Projekte SAII und SDW wurden bzgl. der Steuerung des Quelldrucks in Verschluss-systemen durch Reduktion der effektiven Montmorillonittrockendichte (EMDD) betrachtet.
- 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 Analysen der Ausbauproben (345 Proben) des HTV-5 wurden durchgeführt und werden im 1 HJ 2019 abgeschlossen.
Die MiniSandwich Versuche Nr. 7 & 8 wurden abgebrochen, da nach 1-jähriger Versuchszeit kein hydraulisches Gleichgewicht erzielt wurde. Die Proben wurden mineralogisch/chemisch analysiert. Die Versuche widerspiegeln jedoch den Einfluss der Einbautrockendichte auf den resultierenden Quelldruck bei identischer Einbautrockendichte. Die numerische Analyse der Quelldruckentwicklung war erfolgreich. Es wurden die MiniSandwichversuche Nr. 9 und 10 mit Secursol UHP und Pearsonwasser gestartet. Dabei wurde die EMDD reduziert. Die lasergranulometrische Korngrößenmessung wurde für Einzelkomponenten und Mischungen für die ES durchgeführt und in RRSB-Netzen (nach Rosin, Remmler, Sperling, Bennett in DIN EN 66145) hinsichtlich des $\tan \alpha$ analysiert. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde ein Einzelrohstoff für ES ausgewählt. Dieser wird auf seine hydraulischen Steigeigenschaften in der Harfenapparatur getestet. Die Saugspannungskurven für ES und DS Materialien wurden ermittelt.
Systematische Quelldruckuntersuchungen an Calcigel und Secursol UHP wurden mit deionisiertem Wasser und Pearson Wasser durchgeführt. Der Kationenaustausch führt zu einer Quelldruckerhöhung. Die Wasserdampfadsorptionsisothermen für Secursol UHP wurden gemessen, um Transport-, Lager- und Installationsbedingungen zu bestimmen. Der HTV-6 mit Secursol UHP und Pearson Wasser wurde gestartet und der Fluidaufgabedruck bis auf 9 MPa gesteigert.
- AP11: 4. Projektmeeting (PM) im Oktober 2018 zu den geplanten Arbeiten und dem Fortschritt im Projekt mit Besichtigung des Versuchsortes im Felslabor Mont Terri; anschließend Technisches Meeting zum AP6 Auslegungsrechnungen und AP8 Instrumentierung. Eine detaillierte Projektbeschreibung für das geplante Sandwich-Hauptprojekt einschließlich Zeit- und Kostenplanung wurde im Dezember 2018 fertiggestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- 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
- Analyse der Austrittslösungen MiniSandwich-Versuche Nr. 9 & 10 (Secursol UHP/Pearson Water), Rückbau und mineralogisch/chemische Analyse, sofern chemisches Gleichgewicht erzielt wurde
- Rückbau HTV-6

5. Berichte, Veröffentlichungen

Boháč, P., Delavernhe, L., Zervas, E., Königer, F., Schuhmann, R., & Emmerich, K. Cation: Exchange Capacity of Bentonite in Highly Saline Environment. Mid European Clay Conference (MECC2018). 17.-21. September 2018, Zagreb

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11587B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt B	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2017 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 710.450,00 EUR	Projektleiter: 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

- 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 mit Aussparungen für zwei Versuchsschächte wurde bereits im ersten Halbjahr 2018 eingerichtet.
- AP5: Nach einer Phase von ca. einem halben Jahr, während der das Gebirge um die Schächte instrumentiert wird und vorlaufende Messungen durchgeführt werden, werden die Schächte abgeteuft. Für den Experimentalschacht 1 wurden ein Durchmesser von 1.2 m und eine Tiefe von 12 m festgelegt. Der Schacht wird unmittelbar nach dem Abteufen instrumentiert und mit dem Dichtsystem versehen. Schacht 2 mit gleichem Durchmesser und einer Tiefe von 10 m wird zu einem späteren Zeitpunkt (ca. 1 Jahr nach Inbetriebnahme Schacht 1) mit einem modifizierten Dichtsystem versehen, wobei Erfahrungen aus dem Betrieb von Schacht 1 eingehen. Um Schacht 2 wird sich eine ausgeprägtere Auflockerungszone entwickelt haben. Die Druckkammer zur Aufsättigung des Verschlusses befindet sich jeweils im Bohrloch tiefsten und wird über ein Schrägbohrloch befüllt. Der Injektionsdruck wird schrittweise bis ca. 3 MPa erhöht. Oberhalb des Verschlusses wird ein Widerlager aus Beton eingebaut.
- AP6: Die dreidimensionalen hydraulischen Auslegungsrechnungen wurden zu hydraulisch-mechanisch gekoppelten Simulationen erweitert, außerdem werden jetzt die verschiedenen geologischen Einheiten berücksichtigt. Die gekoppelten Berechnungen bestätigen weitgehend die hydraulische Modellierung. 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. Zurzeit wird die Modellierung der Aufsättigungsphase nach Verschlusseinbringung vorbereitet.
- AP7: Die Schächte werden in Bohrtechnik erstellt, Angebote dazu liegen vor. 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. Bei den Messungen im Versuchsschacht wird noch ein Messverfahren für Deformationsmessungen entwickelt. Eine kabellose Datenübertragung, die im Felslabor von IBeWa getestet wurde, wird auf Grund des Entwicklungsstandes in Schacht 1 nicht realisiert werden, aber möglicherweise in Schacht 2.
- AP9: Eine detaillierte Projektbeschreibung für das geplante Sandwich-Hauptprojekt einschließlich Zeit- und Kostenplanung wurde im Dezember 2018 fertiggestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- HM-Simulation eines Referenzfalls für die Verschlussaufsättigung und von Varianten
- Testplanerstellung Schacht 1
- Abschlussbericht des Sandwich-Vorprojekts

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11607A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2017 bis 30.09.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 656.550,00 EUR	Projektleiter: 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 und Vorbereitungen getroffen, um die Versuche in der Glove Box durchzuführen. Bei der geplanten Öffnung der Glove Box im März werden diese eingeschleust bzw. eingebaut.
Bei der isothermen Titrationskalorimetrie wurde der Einfluss der Variation funktionaler Parameter (Drehzahl des Rührers und Wärmeentwicklung, Raumtemperatur) auf die Messergebnisse bei 25 °C mit Wasser und CsCl-Lösung untersucht. Zur Verringerung der Versuchszeit wurde eine zweite Kanüle in das Messsystem eingebracht und das System darauf abgestimmt (Wartezeiten, Titrationsmengen). Für die vorgesehene Messung von Edelmetall-angreifenden Lösungen (z. B. MgI_2 -Lösung) wurde ein metallfreier Versuchsaufbau gefertigt und erste Tests durchgeführt.
Die isopiestic Messungen für ternäre Lösungen von Cäsiumchlorid mit NaCl, KCl und $MgCl_2$ bei Temperaturen > 25 °C wurden abgeschlossen, die Isopiestic von Cäsiumchlorid mit $CaCl_2$ bei $T > 25$ °C wurde begonnen.
- AP2: Vorversuche zur Rückhaltung von Selenat durch metallisches Eisen wurden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Selenat durch metallisches Eisen in salzhaltigen Lösungen reduziert wird.
- AP5: Erstellung eines generischen Posters und eines Webauftritts für VESPA II.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Für die photometrische Titration der oxidationsempfindlichen Selenide wird die Glove Box umgebaut, das Messsystem aufgebaut und die Messungen begonnen.
Für die Messungen mit der isothermen Titrationskalorimetrie wird eine jodfreie MgI_2 -Stammlösung hergestellt und charakterisiert. Anschließend wird die Verdünnungsenthalpie von MgI_2 und K_2SeO_3 für 25 °C sowie für MgI_2 auch für höhere Temperaturen bestimmt.
Die isopiestic Messungen für ternäre Lösungen von Cäsiumchlorid (CsCl) mit $CaCl_2$ bei Temperaturen > 25 °C werden fortgesetzt. Anschließend erfolgt der Beginn der isopiestic Messungen für das ternäre System Cäsiumsulfat mit Na_2SO_4 , $MgSO_4$ und $CaSO_4$ bei Temperaturen > 25 °C sowie für das System CsCl- $CsSO_4$ - H_2O bei $T \geq 25$ °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.
- AP5: Fertigstellung des generischen Posters und des Webauftritts für VESPA II.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11607B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2017 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 515.767,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Brendler	

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}C , ^{79}Se , ^{129}I und ^{99}Tc in Langzeitsicherheitsnachweisen angenommen werden, abzubauen. Ziel des Teilvorhabens des HZDR ist die Identifikation von Rückhalteprozessen für das Spaltprodukt ^{99}Tc und im geringeren Umfang für ^{79}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 RES³T eingebunden. Ein weiteres Ziel stellt die Untersuchung und Charakterisierung der relevanten niederen Oxidationsstufen des ^{99}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:

- Tc-Rückhaltung an einer Pyrit/Marcasit-Mischung ist unabhängig von der Ionenstärke (IS). SEM-Bilder zeigen eine Morphologie-Änderung der Minerale nach Tc-Kontakt.
- Berechnungen der Fe(II)-Speziation gaben Hinweise zu möglicherweise übersättigten Fe(II)/Fe(III) Sekundärphasen auf Al₂O₃ bei Anwesenheit von sorbiertem Fe²⁺. XPS Messungen zeigten für solche Systeme, dass unter basischen Bedingungen Tc(VII) vorrangig in Tc(IV) übergeht.
- Synthese von FeII-AlIII-Cl Layered Double Hydroxide (LDH) und Charakterisierung mit XRD & SEM, Bestimmung von Zeta-Potential und hydrodynamischen Durchmesser. pH < 6.5: Tc-Rückhaltung steigt mit pH und sinkender IS, pH > 6.5 100 % Tc Rückhaltung bei allen IS. Vorgeschlagene Rückhaltemechanismen: Tc(VII) Anionenaustausch bei niedrigem pH, Reduktion zu Tc(IV) bei hohem pH.

AP2:

- Erste spektro-elektrochemische Reduktionen von Tc(VII) zu Tc(IV) in HNO₃.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

- Quantifizierung des Ionenstärke-Effekts und des pH auf die Rückhaltung an reinem Pyrit und Marcasit.
- Charakterisierung von Fe(II)- & Fe(III)-Sekundärmineralen an Al₂O₃ mit Raman
- Synthese, Charakterisierung und Tc-Rückhaltung an Fe^{II}-Al^{III}-Cl LDH Phasen.
- Untersuchung der Rückhaltung von Tc an Al₂O₃ in Gegenwart von S²⁻.
- XPS, Raman-Mikroskopie, REM & TEM sollen molekulare Mechanismen aufklären, welche die Reduktion von Tc(VII) zu Tc(IV) an Mineralflächen ermöglichen.
- EXAFS & XANES Messungen des Tc-Oxidationszustandes und der atomaren Umgebung (für reines Marcasit, Pyrit und Fe(II)-Al(III)-Cl LDH).

AP2:

- Weitere spektro-elektrochemische Experimente zur Reduktion von Tc(VII) zu Tc(IV) in NaClO₄, HNO₃, NaHCO₃ & NaCl.

5. Berichte, Veröffentlichungen

“Environmental fate of fission products: a comprehensive study”, N. Mayordomo, D. M. Rodríguez, K. Müller. Invited oral presentation in Goldschmidt 2018 conference, August 12-18, Boston (USA).

“⁹⁹Tc retention in pyrite and alumina: the effect of Fe²⁺”, D. M. Rodríguez, N. Mayordomo, K. Müller, T. Stumpf. Oral presentation in 10th international symposium on Technetium and Rhenium - science and utilization, October 3-6, Moscow (Russian).

“Environmental fate of fission products: a comprehensive study”, N. Mayordomo, D. M. Rodríguez, D. Schild, V. Brendler, K. Müller. HZDR 2018 Annual report.

“⁹⁹Tc retention by γ -alumina with and without pre-sorbed Fe²⁺”, N. Mayordomo, D.M. Rodríguez, D. Schild, V. Brendler, K. Müller. HZDR 2018 Annual report.

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 E 11607C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2017 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 504.649,00 EUR	Projektleiter: 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}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}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) Abschluss der Tc(IV)-Löslichkeitsexperimente in verdünnten bis konzentrierten NaCl-Na₂SO₄ sowie konzentrierten MgCl₂-MgSO₄ und CaCl₂-MgSO₄ Lösungen. (ii) Beginn der Analysen zur Aufklärung der wässrigen und festen Tc(IV)-Speziation. (iii) Thermodynamischen Analyse der Systeme. (iv) Veröffentlichung des Manuskripts zu "Impact of nitrate on the redox chemistry of Tc".
- AP2: (i) Fortführung der Langzeit-Rekristallisationsexperimente.
- AP3: (i) Abschluss der Literaturstudie zur Wechselwirkung zwischen Iod und relevanten Mineralphasen. (ii) Optimierung der Synthesen von Grüner Rost-Phasen mit verschiedenen Anionen in der Zwischenschicht. Synthese von Grüner Rost-Mischphasen zwischen reinen Chlorid und Iodid Endgliedern („Einbau“). (iii) Analyse der Festphasen mittels mikroskopischer und spektroskopischer Methoden.
- AP4: (i) Weitere Gas- und Lösungsprobennahmen des Auslaugexperiments mit bestrahltem Kernbrennstoff zur Bestimmung der ¹²⁹I Freisetzung (IRF). (ii) Erste Tests der Methode zur Separation von ¹²⁹I von anderen Radionukliden in alkalischen Lösungen welche in Kontakt mit Kernbrennstoff/Zircaloy waren.
- 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) Auswertung der Tc(IV)-Löslichkeitsexperimente in verdünnten bis konzentrierten NaCl-Na₂SO₄ sowie konzentrierten MgCl₂-MgSO₄ und CaCl₂-MgSO₄ Lösungen. (ii) Abschluss der Analysen zur Aufklärung der wässrigen und festen Tc(IV)-Speziation. (iii) Abschluss der thermodynamischen Analyse der Tc(IV)-SO₄ Systeme. (iv) Experimentplanung für Löslichkeitsstudien im Tc-Gluconat System aus der Unter- und Übersättigung.
- AP2: (i) Monitoring der Rekristallisationsexperimente: XRD, SEM-EDX und ggf. TEM. (ii) Analytische Untersuchungen der rekristallisierten Partikeln (TEM in coop. mit FZJ).
- AP3: (i) Einsatz von XAS zur Untersuchung der Chlorid/Iodid Grüner Rost-Mischphasen. (ii) Vorversuche zur Wechselwirkung („Adsorption“) zwischen Iodid und Grüner Rost-Phasen, und (iii) Vorversuche zu den Alterationsexperimenten mit grünem Rost.
- AP4: (i) Weitere Beprobung des Auslaugexperimentes zum Freisetzungsverhalten von ¹²⁹I. (ii) Weiterentwicklung der Separationsmethode für ¹²⁹I.
- AP5 und AP6: Es sind keine Arbeiten im kommenden Berichtszeitraum geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- Baumann et al.: Impact of nitrate on the redox chemistry and solubility of Tc(IV) in alkaline, dilute to concentrated aqueous NaCl solutions, Applied Geochemistry 98 (2018) 321–330
- Gaona et al.: oral and poster presentations at Tc-Re conference ISTR, Moscow (Russia) (10.2018)
- Gaona et al.: poster presentation at ACS meeting in Boston (USA) (08.2018)

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich		Förderkennzeichen: 02 E 11607D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2017 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 265.296,00 EUR	Projektleiter: Dr. Daniels	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

VESPA II baut auf den Erkenntnissen aus dem Vorläuferprojekt VESPA auf, indem offene Fragen zur Rückhaltung von Radionukliden, der chemischen Thermodynamik von Spalt- und Aktivierungsprodukten, und der Einbindung von Daten und Erkenntnissen in die Langzeitsicherheitsanalyse bearbeitet werden. Dabei sollen insbesondere zuverlässigere chemische Eingangsdaten für langzeitanalytische Modellrechnungen für generische Endlagerbedingungen unterschiedlicher Wirtsgesteinsformationen zur Verfügung gestellt werden. Dies umfasst das Stoffinventar und den Quellterm für ^{129}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}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}I in abgebrannten Brennelementen und damit der maximal aus dem Abfall freisetzbaren ^{129}I -Stoffmenge ermittelt.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

AP1: ^{129}I -Iod-Inventar in bestrahltem Kernbrennstoff: Dieses AP beinhaltet eine Auswertung von Literaturdaten, die dann zur Abschätzung der ^{129}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}I -Iod-Inventar und zur Iod-Geochemie in natürlichen Gewässern ist inn der Vorperiode abgeschlossen und liegt in Berichtform vor.
- AP2: Die Rückhaltung von ^{129}I (Spurenbereich) durch Anionenaustausch wurde an einer Reihe von synthetisch hergestellten (Mg,Ni)Al-LDH mit unterschiedlichem Ni-Gehalt untersucht. Dabei wurde eine schnelle Kinetik des Anionenaustauschprozesses zwischen Cl- und I- in den (Mg,Ni)Al-LDH Phasen beobachtet: d. h. das Gleichgewicht bei dem Austausch wurde innerhalb von 24 Stunden erreicht. Die Ionenaustauschkapazität von (Mg,Ni)Al-LDH Phasen in Bezug auf Iodid korreliert mit dem Ni-Gehalt.
- AP3: Im Vergleich zum Anionenaustausch ist die Kopräzipitation nicht sehr effizient in Bezug auf den Iodid-Einbau in (Mg,Ni)Al-LDH. Mehrere Monate nach dem Kontakt und Kopräzipitation von Ni, Mg, Al und I- und Alterung zeigen die erzeugten LDH Phasen nur eine schwach ausgeprägte Kristallinität.
- AP4: Die Rückhaltung von Iodid durch kalzinierte LDH-Phasen wurde ausführlich untersucht. Nach der thermischen Behandlung bei 500 °C wurden die amorphisierten (Mg,Ni)Al-LDH Phasen in Kontakt mit Jod-haltiger Lösung gebracht. Strukturuntersuchungen (XRD) und Elektronenmikroskopie-Untersuchungen deuten darauf hin, dass die LDH Struktur sich wieder neu bildet und dabei Iodid einbaut. Die K_d Werte des I-Einbaus in Hochtemperatur-LDH sind im Vergleich zum Ionenaustausch signifikant gestiegen, und zwar um den Faktor 17. Ein positiver Einfluss des Ni-Gehalts ist nach der Kalzinierung deutlich erkennbar.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im 1. Halbjahr 2019 werden wie geplant weitere Experimente zur Rückhaltung von ^{129}I durch Anionenaustausch (AP2), die Ko-präzipitation von Iodid (AP3) und durch kalzinierte LDH-Phasen (AP4) durchgeführt. Um den Ni-Effekt auf die Iod-Rückhaltung im Detail auf den Einbau von Iodid in LDH zu untersuchen, werden gemeinsame Infrarot (IR) und EXAFS-Messungen mit KIT-INE durchgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11617A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRIS-TA II), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Felder 3.1 + 3.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2017 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 698.375,69 EUR	Projektleiter: 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. Der bestehende Berichtsentwurf über das Sicherheitskonzept für die drei infrage kommenden Einlagerungsoptionen wurde anhand der Diskussionen mit den Projektpartnern signifikant überarbeitet. In dem Bericht wurden zum einen die nationalen und internationalen Rahmenbedingungen als grundlegende Elemente dokumentiert und zum anderen, darauf aufbauend, 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. Ziel ist es, für die beiden ewG-bezogenen Einlagerungsoptionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ grundlegende FEP-Kataloge zu erstellen. Im Berichtszeitraum wurde der FEP-Katalog für die Option „multipler ewG“ entwickelt.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 4 wurden die Arbeiten zur Quantifizierung der in den Sicherheitsanforderungen qualitativ definierten Integritätskriterien fortgeführt. Eine Quantifizierung ist notwendig, um rechnerische Nachweise führen zu können. Dazu wurden weiter Literaturinformationen gesichtet, die Hinweise auf eine temperaturbedingte Veränderung klüftiger Granitgesteine beschreiben. Zum anderen wurde ein Vorschlag ausgearbeitet, der die in den Sicherheitsanforderungen genannten Schädigungskriterien "Dilatanz-Kriterium" und "Fluiddruck-Kriterium" zu einem einzigen "Riss-Kriterium" zusammenfasst. Der Grund dafür ist, dass kristallines Gestein nicht dilatant reagiert und Festigkeitsüberschreitungen fast ausnahmslos zu Rissbildung führen. Die Formulierung und die Quantifizierung für das „Riss-Kriterium“ wurden in einem ersten Entwurf dokumentiert und werden derzeit geprüft. Begonnen wurde mit den Arbeiten zur Quantifizierung des Advektions-Kriteriums für die Option „multipler ewG“.

Ebenfalls mit Bezug zum Arbeitspaket 4 wurde ein Verfüll- und Verschlusskonzept für die Option „multipler ewG“ entwickelt und in Berichtsform, zunächst im Entwurf, dokumentiert. Dieses Verschlusskonzept ist als vorläufig anzusehen, da im weiteren Verlauf des Projektes noch Anpassungen als Resultat von spezifischen Prozessanalysen zu erwarten sind.

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

- Beginn der Arbeiten zur Beschreibung des Nachweiskonzeptes
- Dokumentation der entwickelten FEP zum „multiplen ewG“ in Katalogform
- Beginn der Arbeiten zum FEP-Katalog „überlagernder ewG“
- Fortführung der Arbeiten zur Quantifizierung der Integritätskriterien
- Prüfung und ggf. Anpassung des Verschlusskonzeptes zum „multiplen ewG“ als Folge von laufenden Prozessanalysen
- Entwicklung von Verfüll- und Verschlusskonzepten für die beiden anderen zu betrachtenden Einlagerungsvarianten „überlagernder ewG“ und „modifiziertes KBS-3 Konzept“

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11617B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRIS-TA II), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2017 bis 30.09.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 352.150,00 EUR	Projektleiter: Dr. Wolf	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Diskussion und Fertigstellung des Berichtentwurfes über die Grundzüge eines Sicherheits- und Nachweisconzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Kristallingestein.
- AP3: Vorbereitung von mehreren langzeitsicherheitlichen FEP für gemeinsame Besprechungen mit BGETEC und BGR am 14.8., 19.9., 15.10., 6.11. und 27.11.2018. Fertigstellung des FEP-Kataloges für die ewG-Konfiguration „multipler ewG“ erstellt.
- AP5: Im Zusammenhang mit dem Konzept eines multiplen ewG hat sich bei der Berechnung der Radionuklidausbreitung im Untergrund die Anforderung ergeben, mehrere voneinander unabhängige Nahfeld-Rechnungen, ggf. mit nachfolgenden Fernfeldpfaden, durchzuführen und deren Output in eine (weitere) gemeinsame Fernfeldrechnung einzuspeisen. Daher wurde das Modul Combiner in C++ entwickelt. Es erlaubt die Zusammenführung einer beliebigen Zahl von Nah- oder Fernbereichsrechnungen, die mit LOPOS, CLAYPOS oder GeoTREND erzeugt wurden. Die Nuklidlisten werden automatisch auf Kompatibilität geprüft und kombiniert. Der Benutzer hat die Möglichkeit, das Zeitraster nach eigenen Wünschen abschnittsweise in linearen oder logarithmischen Schritten zu definieren.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3: Erstellung eines FEP-Kataloges für die ewG-Konfiguration „überdeckender ewG“ (Typ B gemäß AkEnd). Diskussion der Methodik zur Erstellung von FEP-Katalogen für radioaktive Abfälle im Kristallingestein auf einem gemeinsamen Workshop mit UJV und SURAO.
- 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 für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Kristallingestein mit UJV und SURAO.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11627
Vorhabensbezeichnung: Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2017 bis 31.10.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 926.745,00 EUR	Projektleiter: 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 Endlager Hohlräume
- AP2: Ermittlung der geotechnischen Eigenschaften des kompaktierten Gemisches aus dem Ausbruchtonstein mit Bentonitzusatz zur Prüfung der Eignung für den Verschluss der Strecken und Schächte
- AP3: Ermittlung der geotechnischen Eigenschaften des Gemisches aus dem Ausbruchtonstein mit Bentonitzusatz zur Prüfung der Eignung als HAW-Buffermaterial bei hohen Temperaturen in Form von hochverdichteten Formsteinen für Auflager von Abfallbehältern und in Form von Granulat zur Verfüllung des Resthohlraums

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Zur Bestimmung von Temperatureinfluss auf die Wasseraufnahmefähigkeit von Bentonit wurden Wassergehaltsmessungen an 50 Proben, die vorher bei hohen Temperaturen von 25, 50, 100, 150 und 200 °C aufgeheizt wurden, bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten von 30-100 % gestartet.
- Eine Reihe von Quell- und Permeabilitätsversuchen wurden in Oedometerzellen an 5 Bentonitproben mit einer Trockendichte von 1.5 g/cm³ und 5 Tonstein-Bentonit-Gemischproben (70/30) mit einer Trockendichte von 2.0 g/cm³ gestartet, die vorher bei hohen Temperaturen von 25, 50, 100, 150 und 200 °C aufgeheizt wurden. Die Hauptzielsetzung liegt darin, Temperatureinflüsse auf die Quellfähigkeit und Wasserpermeabilität der untersuchten Materialien als HAW- Buffer zu ermitteln.
- Zur Untersuchung des grobkörnigen Ausbruchtonsteins mit Korngröße bis zu 30 mm ist eine große Oedometerzelle mit einem Durchmesser von 280 mm und einer Höhe von 250 mm hergestellt und ein entsprechendes Testsystem zusammengebaut. Damit können die Kompaktion und Wasserpermeabilität des Materials bei mechanischen Beanspruchungen bis zu einer Maximalspannung von 20 MPa bestimmen. Der erste Versuch wurde gestartet mit dem Ausbruchtonstein. Die Probe wird stufenweise verdichtet, wobei die Porosität und Permeabilität in Abhängigkeit von der Belastung gemessen werden.
- Eine Reihe von Quellung-Verdichtungsversuche wurde mit vier Verschlussmaterialien gestartet: (1) kompaktierte Ausbruchtonstein-Blöcken; (2) kompaktierte Tonstein-Bentonit-Blöcken (70/30); (3) lockeres Bentonit-Pellets/ Pulver-Gemisch (80/20) und (4) lockeres Tonstein-Bentonit-Gemisch (70/30). Die Proben werden in Oedometerzellen (D=120 mm, H=50-80 mm) eingebaut und zuerst mit Opalinustonwasser geflutet, wobei die drucklosen Quellverformungen gemessen werden. Danach werden sie stufenweise verdichtet, um die Kompaktion und Wasserpermeabilität bei erhöhten Spannungen zu bestimmen.
- 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 akzeptiert.
- Teilnahme und Vortrag bei der Fachtagung “The 7th Chinese National Conference on Underground Waste Management & International Workshop on Radioactive Waste Disposal, August 24-26, 2018, Shanghai“.
- Besuch des Beijing Research Institute of Uranium Geology (BRIUG) im August 2018 zum Erfahrungsaustausch im Bereich der Bentonitforschung als Buffer-/Verschlussbaumaterial in HAW-Endlagern und Besichtigung einer Bentonit-Lagestätte.

4. Geplante Weiterarbeiten

Folgende Versuche werden im nächsten Halbjahr gestartet und durchgeführt:

- Fortführung aller gestarteten Langzeitversuche
- Starten der Messungen von thermischer Leitfähigkeit der untersuchten Materialien

5. Berichte, Veröffentlichungen

Zhang CL: THM Behaviour of Clay Rock for Disposal of Radioactive Waste, the 7th Chinese National Conference on Underground Waste Management & International Workshop on Radioactive Waste Disposal, August 24-26, 2018, Shanghai.

Zhang CL and Kröhn KP: Sealing behaviour of crushed claystone–bentonite mixtures, Geomechanics for Energy and the Environment 17(2019) 90–105, <https://doi.org/10.1016/j.gete.2018.09.004>

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 E 11637A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt A: 3D-Spannungsmodell und Aufskalierung		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2018 bis 31.12.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 203.400,00 EUR	Projektleiter: 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 Untergundaufbau (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 km³) erstellt. Dieses Modell wird an punktuell gemessenen Spannungsdaten kalibriert und ermöglicht auf Basis kontinuumsmechanischer Ansätze Prognosen für Bereiche ohne Spannungsdaten und die Ableitung aller sechs Komponenten des Spannungstensors. Darüber hinaus werden Modellierungswerkzeuge für räumliche Skalen übergreifende Modelle entwickelt. So wird ein konsistenter Spannungsübertrag zwischen dem Deutschland-Modell und ca. drei Größenordnungen kleineren Teilmodellen ermöglicht. Alle Arbeiten liefern die erforderlichen Grundlagen und Modellierungswerkzeuge für zukünftige geomechanische Standortmodelle.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundprojekt gliedert sich in zwei Arbeitspakete (APs):

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Nach einem wegen des zeitlich versetzten Projektbeginns an den verschiedenen Standorten erforderlichen Abstimmungstreffens im Mai 2018 fand das eigentliche Kickoff Meeting des Forschungsverbundes am 01.10.2018 in Darmstadt statt. Dabei wurden u. a. Details zum Modellaufbau, zur Diskretisierung sowie zu den erforderlichen Materialkennwerten und Kalibrierungsgrößen diskutiert. Darauf aufbauend wurde anhand eines simplifizierten 3D-Modells der Workflow für das spätere, deutlich komplexere Modell ausgearbeitet und getestet. Dieses Testmodell besteht aus drei Horizonten (Erdoberfläche, Moho, Modellbasis) bzw. zwei Einheiten (Erdkruste, oberste Mantellithosphäre), entspricht jedoch in den Dimensionen bereits dem späteren Deutschland-Modell. Der Vorteil eines solchen vereinfachten Modells sind dessen geringere geometrische Komplexität und die relativ kurzen Rechenzeiten, die die Ausarbeitung und das Testen des Workflows deutlich beschleunigten. Anhand dieses Modells wurden alle Arbeitsschritte von der Erstellung des tektonischen Modells, dem Aufbau des geomechanischen Modells, dem Aufbringen von Randbedingungen und initialen Spannungen, der eigentlichen Simulation, der anschließenden Kalibrierung bis hin zur Auswertung der Ergebnisse getestet und soweit möglich automatisiert. Weiterhin wurde dieses simplifizierte Modell genutzt, um die laterale Erstreckung des zukünftigen Modells und geeignete Randbedingungen festzulegen. So ist gewährleistet, dass das Modell zur Vermeidung von Randeffekten über die Grenzen von Deutschland hinaus ausreichend groß dimensioniert ist und entlang der Modellränder homogene Randbedingungen in Einklang mit der überregionalen, aus der World Stress Map abgeleiteten Spannungsorientierung definiert werden können.

Im Zuge der Datenkompilation für die später deutlich komplexere Geometrie des Modells wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um alle wichtigen für das Projektgebiet publizierten Informationen über den Untergundaufbau zu sichten. Die gesammelten Daten wurden anschließend in eine Datenbank eingepflegt. Der Schwerpunkt lag dabei auf bereits vorhandenen 3D-Modellen und tiefenrefraktionsseismischen Studien, die insbesondere Informationen über den Aufbau der tieferen Erdkruste liefern.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im ersten Halbjahr 2019 werden folgende Arbeitsschwerpunkte adressiert:

- Abschluss der Datenkompilation der für das 3D-Modell relevanten Störungen
- Zusammenstellung der mechanischen Stratigraphie, inklusive der relevanten physikalischen Parameter der Lithologien (Dichte, elastische und plastische Eigenschaften)
- Zusammenfassung und Verschneidung der stratigraphischen und lithologischen Schichtgrenzen zu einem in sich konsistenten strukturgeologischen Modell
- Zusammenstellung von Konzepten zur Aufskalierung mechanischer Gesteinseigenschaften (z. B. GSI, RMR, Q-System, DFN) und Anwendung auf generische Beispiele

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

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Telegrafenberg, 14473 Potsdam		Förderkennzeichen: 02 E 11637B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt B: Multiskalenansatz		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2018 bis 31.12.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 228.586,00 EUR	Projektleiter: 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 km³) 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

Wie schon im vorangegangenen Bericht erwähnt, konnten wir aufgrund der Arbeitsmarktsituation für Fachkräfte für das Teilprojekt B (AP2) erst zum 1. November 2018 eine Einstellung vornehmen. Das Warten hat sich gelohnt, da wir mit Sophia Morawietz eine sehr gute Fachkraft für dieses Thema gewinnen konnten. Um Verzögerungen im Projekt zu vermeiden, hatten wir aus GFZ Haushaltsmitteln seit Mai 2018 zwei Studierende der Geowissenschaften als wissenschaftliche Hilfskräfte angestellt. Diese haben ca. 120 Literaturquellen zu Spannungsmagnitudendaten in Deutschland und angrenzender Gebiete (Niederlande, Belgien, Frankreich, Schweiz, Österreich, Polen, Dänemark) zusammengetragen, digitalisiert und die Daten aus den Publikationen extrahiert und die für eine fachliche Beurteilung aufbereitet.

In den zwei Monaten, in denen sich Frau Morawietz in das Projekt eingearbeitet hat, konnte sie erfolgreich die Kompilation von Spannungsmagnitudendaten übernehmen und die Arbeiten weiterführen. Derzeit sind ca. 450 Datensätze zu Spannungsmagnitudendaten erfasst. Insbesondere wurden die neuen Daten ersten groben Qualitätskategorien zugeordnet und nach den geologischen- geomechanischen Einheiten, in denen die Daten vorlagen, klassifiziert. Dieser Schritt war notwendig, um sicher zu stellen, dass in den komplementären Teilprojekt A des KIT und der TU Darmstadt, in denen die Modellgeometrie und die Schichtung im Modellgebiet derzeit bearbeitet bzw. festgelegt wird, aufeinander abgestimmt sind. Insbesondere müssen bei der Modellbildung die Schichten in dem Modell repräsentiert werden in denen qualitativ hochwertige und/oder zahlreiche Daten zu Spannungsmagnituden vorliegen.

Zunächst werden die Daten in einer Matlab Datenbank zusammengefasst, um diese anschließend in die Datenbankstruktur der Software postgresQL zu überführen. Ziel ist es diese Daten in die Datenbank des World Stress Map (WSM) Projektes zu überführen, da hiermit ein langfristiger und nachhaltiger öffentlicher Zugang zu den Daten gesichert werden kann. Die aktuelle WSM Datenbank, die momentan nur die Orientierung der größten horizontalen Spannung S_{Hmax} systematisch kompiliert, wird derzeit sowohl technisch (neue Datenbankstruktur) als auch inhaltlich (Hinzunahme der Spannungsmagnitudendaten) in Zusammenarbeit mit Frau Steffi Lammers (GIS Spezialistin Arbeitsgruppe Heidbach) weiterentwickelt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Für das erste Halbjahr 2019 werden folgende Arbeitsschwerpunkte adressiert:

- Abschluss der Datenkompilation inkl. der Erfassung sämtlicher Literaturstellen in einer Literaturdatenbank inkl. der dazugehörigen pdf-files.
- Erfassen aller Informationen zu den Datensätzen in einer Matlab Datenbank die so konzipiert ist, dass eine schnelle Überführung in PostgreSQL gesichert ist.
- Entwicklung eines ersten Quality Ranking für Datensätze zu Spannungsmagnituden, die als Gewichtung für die Modellkalibrierung mit FAST Calibration dienen soll.
- Vorbereitung einer Publikation der Spannungsmagnituden-Datenbank; diese Veröffentlichung hängt stark vom Freigabezeitpunkt der Daten der Industriepartner ab, so dass wir Anfang 2019 mit den Freigabeanfragen begonnen haben.
- Präsentation der ersten Ergebnisse auf der Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft in Braunschweig vom 3.-7. März 2019. Hier ist ein Schwerpunktthema die Endlagerforschung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		Förderkennzeichen: 02 E 11637C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Geomechanisch-numerische Modellierungen zur Charakterisierung des tektonischen Spannungszustandes für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland (SpannEnD), Teilprojekt C: Geomechanik von Sedimentbecken		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 2: Wissenschaftliche Grundlagen der Standortauswahl, Feld 2.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2018 bis 31.12.2020	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 175.974,00 EUR	Projektleiter: 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 km³) 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

Das Verbundprojekt gliedert sich in zwei Arbeitspakete (APs):

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Am 1.9. 2018 erfolgte die Einstellung von Frau Luisa Röckel.

AP1.2 Aufgabe: Aufbau Modellgeometrie und Parametrisierung

- Festlegung der Modellränder:
Gemeinsam mit den Projektpartnern TU Darmstadt und GFZ Potsdam wurden beim Arbeitstreffen am 12.05.2018 in Karlsruhe vorläufige Modellgrenzen definiert und beim Arbeitstreffen am 13.12.2018 in Darmstadt präzisiert.
- Einbindung eines 3D Modells
Als Grundlage für die Modellierung kann auf ein 3D Modell Deutschlands zurückgegriffen werden. Dieses lithosphärenskalige Modell wurde aus drei überlappenden Modellen (URG, MOLA und CEBS) erstellt und soll im Laufe des Jahres publiziert werden. Das Modell muss für SpannEnD lateral erweitert und vertikal modifiziert werden, um für die Fragestellungen zum 3D-Spannungsfeld genutzt werden zu können. Die Übergabe des Modells ist in den kommenden Wochen geplant.
- Einbindung von Störungsdaten
Das LIAG stellt einen Katalog mit rund 900 Störungen zur Verfügung, der für das Projekt genutzt werden kann. Dieser Katalog umfasst ein Shapefile der Störungen. Weiterhin sind Informationen wie Aktivität und Versatz der Störungen hinterlegt. Anhand dieser Eigenschaften soll entschieden werden, welche Störungen im Deutschlandmodell implementiert werden. Zusätzlich werden weitere Quellen für Informationen über Störungen gesichtet und zusammengestellt.
- Randbedingungen
Als Beiträge zu den Randbedingungen des tektonischen Spannungsfelds werden die World Stress Map (WSM) (Orientierungsdaten, Stand 2016) und die Q-WSM (Magnitudendaten) genutzt. Auch werden Daten aus jüngeren Veröffentlichungen genutzt.

AP2.1 Zuarbeit zur Aufgabe Aufbau und Beschreibung einer Datenbank:

Daten aus Bayern und Baden-Württemberg wurden gesichtet, Daten aus Bayern sind bisher nur eingeschränkt nutzbar. Es steht noch die Einwilligung der Besitzer zur Veröffentlichung der zur Verfügung gestellten Daten aus.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Fortführung Modellaufbau: Es findet ein regelmäßiger Austausch der Arbeitsgruppen statt. Insbesondere bei der Modellergänzung müssen Vereinfachungen bzw. Annahmen getroffen werden. Diese können nur in gemeinsamer Abstimmung erfolgen. Weiterhin werden die im Modell implementierten Schichten überarbeitet und gegebenenfalls neue Schichten eingefügt oder Schichten mit ähnlichem geomechanischem Verhalten zusammengefasst werden. Das Modell muss zudem neu „gemischt“ werden. Das genaue Vorgehen dabei wird noch zwischen TU Darmstadt und KIT abgestimmt, um eine möglichst effiziente und reibungslose Übergabe der Ergebnisse zwischen den Modellen und Modellskalen sicherzustellen. Ansonsten stehen Weiterarbeiten an der Erstellung der 3D Modellgeometrie, die Sichtung der Spannungsindikatoren und die Auswahl der zu implementierenden Störungen an.
- Erste generische Modelle zum Spannungstransfer über Randstörungen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Das Projekt wurde 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

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11647
Vorhabensbezeichnung: Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2018 bis 31.03.2021	Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.110.710,00 EUR	Projektleiter: 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 Salt Clubs und dem Workshop zur US-Deutschen Kooperation in Hannover.

- Teilnahme am 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.
- Der NEA Bericht “Compiling a Set of Essential Records for a Radioactive Waste Repository” wurde veröffentlicht.
- Teilnahme an der EBS Task Force in Tokio. Präsentation der Ergebnisse aus dem Aufsättigungsversuch mit begrenzter Wasserzufuhr (WiGru-7).
- Teilnahme am Technical Information Meeting und dem International Joint Committee Meeting in Äspö.
- Teilnahme am jährlichen Meeting des IAEA Projekts MODARIA 2.
- Durchführung des IGSC Internal Peer-Review zum Bericht und der neuen IFEP Liste, Version 3.

TA2:

- Benchmark Sensitivitätsanalyse: Auswahl von sieben Modellsystemen (aus Deutschland, USA, Belgien) für die vergleichende Analyse; Auswertung vorhandener Ergebnisse zweier Modelle anhand von im Projekt MOSEL identifizierten Methoden: amerikanisches Modell für ein Endlager im Schiefer, belgisches Modell für ein oberflächennahes Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Dessel.

4. Geplante Weiterarbeiten

TA1:

- Teilnahme an der kommenden Sitzung des RWMC und der nächsten IGSC Core Group Sitzung. Mitarbeit bei der Erstellung des PoW der IGSC.
- Teilnahme am IDKM-Workshop der OECD/NEA mit einem Vortrag zum Thema “Compiling of a Set of Essential Records for future Generations”.
- Teilnahme an der nächsten Sitzung des AK Szenarienentwicklung.
- Teilnahme an der nächsten EBS Task Force in Barcelona.
- 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.
- Vorstellung einiger Ergebnisse auf der IHLRWM in Knoxville, TN, USA.

5. Berichte, Veröffentlichungen

NEA: Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations: Compiling a Set of Essential Records (SER) for a Radioactive Waste Repository. OECD/NEA, Paris, 2018

Kröhn, K.-P.: Re-saturation of compacted bentonite under repository-relevant flow conditions. FKZ 02 E 11102 (BMW). Geomechanics for Energy and the Environment, Elsevier, 2018

AK Szenarien: Wahrscheinlichkeitsklassen und Umgang mit unwahrscheinlichen Entwicklungen“ atw Vol. 63 (2018) | Ausgabe 11/12: 594-601

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11658A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2018 bis 30.04.2021	Berichtszeitraum: 01.10.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 466.700,00 EUR	Projektleiter: Dr. Rübel

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

- AP3.1: 3D-Radionuklid-Transportrechnungen mit d^{3f++}
- AP3.2: Integrierte 1D-Radionuklid-Transportrechnungen mit CLAYPOS
- AP3.3: Integrierte Radionuklid-Transportrechnungen mit REPOTREND
- AP3.4: Rechnungen zum Radionuklidtransport in der Gasphase mit TOUGH2
- AP3.5: Bewertung

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP3.1: Erstellung der Modellierungsstrategie für die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen im Projekt ANSICHT-II. Im Gegensatz zum Projekt ANSICHT-I, in dem ausschließlich der diffusive Transport beispielhaft für den Abfalltyp abgebrannter Brennelemente betrachtet wurde, sollen in ANSICHT-II alle hochradioaktiven Abfalltypen und die Möglichkeit eines advektiven Radionuklidtransports berücksichtigt werden. Deshalb ist es im Gegensatz zu ANSICHT-I nun geplant, eine Kombination der Rechenprogramme CLAYPOS für die Mobilisierung und den Transport im Nahfeld sowie GeoTREND-POSA für den Transport im Wirtsgestein einzusetzen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3.1: Übernahme des geologischen Modells der BGR für das Endlagerstandortmodell von ANSICHT-Süd und Erstellung des hydrogeologischen Modells für die Rechnung zur Grundwasserströmung mit d^3f^{++} .

AP3.2: Durchführung der langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen für das Endlagerstandortmodell von ANSICHT-Süd.

Vorlaufend werden die Eingangsparameter für die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen bezüglich dem Abfallinventar, der Endlagergeometrie, der Radionuklidmobilisierung und dem Radionuklidtransport festgelegt.

AP3.4: Festlegung der Modellierungsstrategie für die Rechnungen zum Gastransport mit TOUGH2. Dazu werden in einem ersten Schritt die unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Versionen von TOUGH2 evaluiert und eine Festlegung bezüglich der zu verwendenden Programmversion getroffen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11658B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2018 bis 30.04.2021	Berichtszeitraum: 01.10.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 479.565,24 EUR	Projektleiter: Jobmann	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde mit den Arbeiten zum Arbeitspaket 2 begonnen. In einem ersten Schritt erfolgte eine Prüfung des Einlagerungs- sowie Verfüll- und Verschlusskonzeptes für den Fall der Einlagerung von Abfallgebinden in vertikalen Bohrlöchern eines Endlagers im Tongestein.

Gemäß dem bisherigen im Rahmen des Projektes ANSICHT entwickelten Konzeptes werden je Einlagerungsbohrloch drei Behälter, umhüllt von einem aus Edelstahl bestehenden Innenliner, eingelagert, der wiederum mit einem Buffer aus kompaktiertem arteigenem aufbereitetem Ausbruchsmaterial umgeben ist. Jedes Bohrloch ist darüber hinaus mit einem äußeren Bohrlochliner versehen, der das Bohrloch stabilisiert, um die Einbringung von Behälter/Innenliner und Buffer zu ermöglichen. Nach Verfüllung des Resthohlraumes und Verschluss des Innenliners wird das Bohrloch mit einem Bentonit-Dichtelement und einem zugehörigen Widerlager versiegelt.

Die Prüfung hinsichtlich der Nachweisführung ergab, dass dieses Konzept Optimierungspotenzial besitzt. Aus jetziger Sicht erscheint es sinnvoll, auf den Buffer und den Außenliner zu verzichten, so dass der Innenliner auch die Funktion der Bohrlochstabilisierung übernimmt. Der Innenliner, dessen Material im Detail noch festzulegen ist, wird um 2,5 m verlängert, so dass zwischen dem obersten Behälter und dem Linerdeckel eine ausreichende Mächtigkeit für eine Sandverfüllung als Abschirmwirkung besteht. Der Bohrlochverschluss wird lediglich hinsichtlich der Ausführung des Widerlagers geändert. Das Bentonit-Dichtelement bleibt in der bisherigen Form erhalten. Der größere Abstand zu den wärmeerzeugenden Behältern bedingt eine geringere Beeinflussung der Bentonitdichtung durch Temperatureinwirkung, was die Nachweisführung vereinfacht.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Überprüfung der weiteren Elemente des aktuellen Verfüll- und Verschlusskonzeptes hinsichtlich Verbesserungsmöglichkeiten mit Blick auf die Nachweisführung.
- Entwicklung konzeptueller Modelle für die einzelnen aktualisierten Barrierenkomponenten.
- In Anlehnung an das konzeptuelle Modell soll eine vollständige Erarbeitung der individuellen Sicherheitsfunktionen, den dazu notwendigen Leistungszielen der Komponenten und den damit verbundenen Konstruktionsanforderungen erfolgen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11668A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld 4.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 28.02.2022	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 986.599,00 EUR	Projektleiter: Dr. Noseck	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt SMILE (Partner: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR) und Institut für Nukleare Entsorgung des KIT (KIT-INE)) basiert auf den Erkenntnissen der Vorhaben ESTRAL und WEIMAR, in denen das Smart-K_d Konzept für Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt, optimiert und in das Rechenprogramm r³t implementiert wurde. In SMILE sollen (i) das bisher entwickelte Konzept um den Einfluss von Redoxreaktionen erweitert, (ii) die chemische Beschreibung durch die Ermittlung der Stöchiometrie, Struktur und thermodynamischer Parameter wichtiger Oberflächenkomplexe weiter untermauert, (iii) unterschiedliche State-of-the-art Oberflächenkomplexmodelle zur Auswertung von vorhandenen experimentellen Daten angewandt, (iv) die Sorptions-Datenbasis durch geeignete Batch- und Säulenexperimente weiter ergänzt und (v) das Konzept durch gezielte Experimente und Modellierung von naturnahen Systemen kritisch überprüft werden. Das hier zu entwickelnde Konzept wird sowohl auf andere Formationen als auch auf andere Codes übertragbar sein und somit auch einen Wissenstransfer zu anderen Forschungsfeldern gestatten.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Durchführung eines Abstimmungsgesprächs mit BGR zu den vorhandenen geochemischen, hydrogeologischen und mineralogischen Daten am Standort Haren (Emsland), der zur Entwicklung des konzeptuellen Modells für die Implementierung der Redoxprozesse verwendet werden soll.
Durchführung von zwei Arbeitstreffen zur Erarbeitung einer Strategie für die Implementierung der Redoxprozesse. Zusammenstellung der relevanten Redoxspezies und -reaktionen und der zugehörigen thermodynamischen Daten.
- AP3: Erarbeitung eines konkreten Laborprogramms zum Vergleich der bei HZDR und GRS durchgeführten Batch-Methoden und deren Optimierung.
Planung und Koordination der Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten zur Erweiterung der Datenbasis für die Sorption von Europium an Quarz und Orthoklas.
- AP6: Durchführung eines Kick-Off Meetings mit den Verbundpartnern zur Planung, Koordinierung und Priorisierung der Arbeiten. Festlegung einer gemeinsamen Vorgehensweise zur Vernetzung der experimentellen Arbeiten.
Ausarbeitung aktualisierter Inhalte für die Internetpräsenz des Smart- K_d -Konzepts.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Durchführung weiterer Arbeitstreffen zur Weiterentwicklung des Konzepts zur Implementierung von Redoxprozessen sowie Arbeitstreffen mit dem G-CSC Frankfurt zur finalen Implementierung des aktualisierten WEIMAR-Konzepts.
- AP2: Entwicklung einer Vorgehensweise zur Verifizierung des aktualisierten WEIMAR-Konzepts.
- AP3: Durchführung gemeinsamer Titrationsexperimente an Quarz mit der neuen Apparatur des Verbundpartners KIT-INE zur automatisierten Durchführung von Säulenversuchen.
Durchführung von Batch-Sorptionsexperimenten zur Vervollständigung der Datenbasis für die Sorption von Europium an Quarz und Orthoklas. Durchführung von Sorptionsexperimenten in Anwesenheit von Liganden (Sulfat) in unterschiedlicher Konzentration.
Betreuung der Bachelor-, Master- und Studienarbeiten.
- AP6: Durchführung eines weiteren Projekttreffens mit den Verbundpartnern HZDR und KIT-INE in Dresden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

S. Britz: Europium sorption experiments with muscovite, orthoclase, and quartz: Modeling of surface complexation and reactive transport. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2018

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11668B
Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 28.02.2022	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 580.851,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Brendler	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Durchführung eines Abstimmungsgesprächs mit BGR zu den vorhandenen geochemischen, hydrogeologischen und mineralogischen Daten am Standort Haren (Emsland), der zur Entwicklung des konzeptuellen Modells für die Implementierung der Redoxprozesse verwendet werden soll.

Durchführung von zwei Arbeitstreffen zur Erarbeitung einer Strategie für die Implementierung der Redoxprozesse. Zusammenstellung der relevanten Redoxspezies und -reaktionen und der zugehörigen thermodynamischen Daten.

AP3: Aufarbeitung und Vergleich vorhandener Daten (Batchversuche und spektroskopische Ergebnisse) für Orthoklas, Quarz und Muskovit in Zusammenarbeit mit GRS, Ergänzende Arbeiten durch Bachelor- und Masterarbeit.

Durchführung von Vorversuchen zur Auswahl geeigneter Reaktionsbedingungen und Probenvorbereitung für Experimente zur Strukturaufklärung wichtiger Sorptionskomplexe mittels Oberflächenröntgenbeugung.

AP6: Durchführung eines Kick-Off Meetings mit den Verbundpartnern zur Planung, Koordinierung und Priorisierung der Arbeiten. Festlegung einer gemeinsamen Vorgehensweise zur Vernetzung der experimentellen Arbeiten.

Ausarbeitung aktualisierter Inhalte für die Internetpräsenz des Smart-K_d-Konzepts.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Durchführung weiterer Arbeitstreffen zur Weiterentwicklung des Konzepts zur Implementierung von Redoxprozessen sowie Arbeitstreffen mit dem G-CSC Frankfurt zur finalen Implementierung des aktualisierten WEIMAR-Konzepts.

AP2: Entwicklung einer Vorgehensweise zur Verifizierung des aktualisierten WEIMAR-Konzepts.

AP3: Durchführung von Batch-Sorptionsexperimenten zur Vervollständigung der Datenbasis für die Sorption von Europium an Quarz und Orthoklas. Durchführung von Sorptionsexperimenten in Anwesenheit von Liganden (Sulfat) in unterschiedlicher Konzentration.

Betreuung der Bachelor-, Master- und Studienarbeiten.

Identifizierung erster wichtiger Sorptionskomplexe auf Orthoklas und Muskovit mittels Oberflächenröntgenbeugung, Sorptionsexperimente mit redoxaktiven Radionukliden und Mineralphasen (Planung und erste Vorversuche).

AP6: Durchführung eines weiteren Projekttreffens mit den Verbundpartnern GRS und KIT-INE in Dresden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie(KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 E 11668C
Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis, Feld: 4.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 28.02.2022	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 117.142,34 EUR	Projektleiter: Dr. Lützenkirchen	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt SMILE (Partner: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR) und Institut für Nukleare Entsorgung des KIT (KIT-INE)) basiert auf den Erkenntnissen der Vorhaben ESTRAL und WEIMAR, in denen das Smart-K_d Konzept für Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt, optimiert und in das Rechenprogramm r³t implementiert wurde. In SMILE sollen (i) das bisher entwickelte Konzept um den Einfluss von Redoxreaktionen erweitert, (ii) die chemische Beschreibung durch die Ermittlung der Stöchiometrie, Struktur und thermodynamischer Parameter wichtiger Oberflächenkomplexe weiter untermauert, (iii) unterschiedliche State-of-the-art Oberflächenkomplexmodelle zur Auswertung von vorhandenen experimentellen Daten angewandt, (iv) die Sorptions-Datenbasis durch geeignete Batch- und Säulenexperimente weiter ergänzt und (v) das Konzept durch gezielte Experimente und Modellierung von naturnahen Systemen kritisch überprüft werden. Das hier zu entwickelnde Konzept wird sowohl auf andere Formationen als auch auf andere Codes übertragbar sein und somit auch einen Wissenstransfer zu anderen Forschungsfeldern gestatten.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3: Bestellung der Äkta-Anlage (Lieferung 09.02.19)
Vorbehandlung und Charakterisierung mehrere Sande
Kinetik-Batch-Versuche an (Eu Sorption) an zweien der Sande zur Festlegung von
Äquilibrierungszeiten
Titrationsversuche mit den ausgewählten Sanden
AP3: Kick-Off Meeting in Braunschweig

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3: Installation der Äkta-Anlage (mit Servicepersonal)
Schulung zur Nutzung der Äkta-Anlage
Auswertung der ersten Batch- und Titrations-Versuche
Erste Durchflussversuche mit den ausgewählten Sanden
Weitere Batch-Versuche

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11678
Vorhabensbezeichnung: Untersuchungen zur Vervollständigung von Stoffmodellen für Salz- oder Sorelbeton sowie spezieller low-ph und hochdichter bzw. hochfester Betone zum rechnerischen Nachweis der Rissbeschränkung für Bauwerke (UVERSTOFF)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 304.370,76 EUR	Projektleiter: Dr. Müller-Hoeppe	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Ausgehend vom klassischen Konstruktionsbeton wurde die historische Entwicklung und des Betonstoffmodells kurz zusammengefasst. Mit der Zunahme der Anwendungsgebiete, z. B. beim Übergang vom Stahlbeton zum Spannbeton, musste das jeweils vorhandene Betonstoffmodell durch weitere Teilstoffmodelle ergänzt werden. Ausgehend von einem elastischen Verhalten mit Festigkeitsgrenze, das für Stahlbeton ausreicht, erforderte die Anwendung des Spannbetons die Erfassung von Schwinden und Kriechen (viskoplastisches bzw. viskoelastisches Verhalten). Der Übergang zum Massenbeton erforderte die Berücksichtigung der Hydratationswärmeentwicklung beim Abbinden und die Beschreibung der altersabhängigen Entwicklung der Baustoffeigenschaften. Informationen zum Stand der Stoffmodellbeschreibung bei thermischer Aktivierung im ausgehärteten Zustand werden derzeit recherchiert. Die Übertragung einzelner Teilstoffmodelle auf Salz- und Sorelbeton wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich vorgenommen, so dass die Eignung der übertragenen Teilstoffmodelle gegeben ist. Dies gilt insbesondere für Teilstoffmodelle, die die Eigenschaften beschreiben, die sich in Kurzzeitversuchen ermitteln lassen. Zu den Eigenschaften, für deren Ermittlung Langzeitversuche erforderlich sind, wird derzeit recherchiert.
- AP2: Mit der Zusammenstellung versuchstechnischer Grundlagen wurde begonnen. Dabei erfolgte im ersten im ersten Schritt eine Konzentration auf den Sorelbeton. Es erfolgte eine Anfrage zu Rezepturzusammensetzungen, die bisher im Zusammenhang mit dem Bau von Verschlussystemen für Endlagern im Salz untersucht wurden, wobei eine Eingrenzung auf Rezepturen erfolgte, die für die Ortbetonbauweise geeignet sind.
- AP3: Im Rahmen des Projektes LASA wurde das Verformungsverhalten von Sorelbeton unter triaxialer Druckbelastung und Temperaturerhöhung experimentell erfasst. Mit der Aufbereitung der Versuchsdaten wurde begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Recherche zu den Teilstoffmodellen zur Beschreibung des viskosen Verhaltens von Beton und zur thermischen Aktivierung im erhärteten Zustand wird fortgesetzt. Die Recherche zur Übertragbarkeit und Eignung von Teilstoffmodellen zur Beschreibung des viskosen Verhaltens auf Salz- und Sorelbeton wird fortgesetzt.
- AP2: Die Ergebnisse der Anfrage zu den Sorelbetonrezepturen werden ausgewertet.
- AP3: Die Aufbereitung der Versuchsdaten zum Verformungsverhalten von Sorelbeton wird fortgesetzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Clausthal, Adolf-Römer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		Förderkennzeichen: 02 E 11688
Vorhabensbezeichnung: Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2021	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 506.541,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Düsterloh	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Angebotseinholung/Vertragsverhandlungen mit GTS Teutschenthal.
- AP2: Herstellung von Salzschnittblöcken für ein Abdichtungssystem mit Fugenfüllung.
- AP3: Dummy-Testversuche zur Validierung und Verifizierung einer versuchsbezogenen Regelungssoftware, Langzeitversuche mit Stahldummy zur Prüfung der Dichtigkeit des Gasdruckkreislaufes, zur Temperierung der Anlagensysteme und zur Konstanthaltung der hydraulischen Drücke unter Laborbedingungen.
Modifikation des unteren Druckstückes und der Fixierung der Prüfkörperummantelung.
- AP4: Überführung der in 02E11425 erarbeiteten FLAC3D-4.0-Berechnungsmodelle in FLAC3D-5.0 und Durchführung von Testberechnungen für kleine Fugenbreiten von $d = 0,1\text{mm}$ (→ rechnerische Simulation Abdichtungselement ohne Fugen).

4. Geplante Weiterarbeiten

- Finale Testversuche zur Regelungssoftware und zur Messwerterfassung.
- Einbau Abdichtungssystem aus Salzschnittblöcken ohne Fugenfüllung und Versuchsdurchführung.
- Begleitende rechnerische Reanalyse des Versuchs in Verbindung mit Prognoseberechnungen zum erwarteten Tragverhalten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11698
Vorhabensbezeichnung: Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwirkungen auf zementbasierte Dichtelemente (THYMECZ)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2021	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.575.514,00 EUR	Projektleiter: Dr. Meyer	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: In diesem Arbeitspaket erfolgt die Zusammenstellung bzw. Entwicklung geeigneter Untersuchungsmethoden basierend auf vorlaufenden FuE-Vorhaben. Es erfolgte im Oktober 2018 ein Abstimmungsgespräch zwischen GRS und BGE bei dem das Projekt THyMeCZ der BGE vorgestellt wurde und die in Betracht kommenden Materialien definiert worden sind. Als Ergebnis des Gespräches werden der GRS In-situ-Proben zur Verfügung gestellt, die in das Arbeitsprogramm integriert werden dürfen. Die Bereitstellung/Herstellung der Untersuchungsmaterialien wird somit im ersten Quartal 2019 abgeschlossen sein.

- AP2: Die Proben für die hydraulisch-chemischen Proben werden an den HC-Messstand nach deren Fertigstellung angeschlossen. Es sollen insgesamt 16 Proben parallel bearbeitet werden können.
- AP3: Für die HMC-Untersuchungen steht bereits ein Messstand mit 4 Autoklaven zur Verfügung. Bereits zu Beginn des Projektes konnten daher Versuche mit monolithischen Probekörpern des A1 und D4 beginnen, die bereits für das LAVA II Projekt hergestellt worden waren. Die Gaspermeabilität für die Rezeptur D4 lag in einer Größenordnung von 10^{-18} m^2 , bei der Rezeptur A1 lag die gemessene Gaspermeabilität in einer Größenordnung von $7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Für die Probe A1-26 konnte eine Lösungspereabilität (NaCl) von $3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ gemessen werden, für die Probe A1-27 die mit IP21 durchströmt worden ist, wurde eine Permeabilität von $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ beobachtet.
- AP4: Für die THC-Versuche wurde ein Messstand aufgebaut, wobei ein Aufbau entsprechend den HC-Versuchen in einem Klimaschrank realisiert worden ist. Die ersten Voruntersuchungen haben gezeigt, dass diese Methode zur Anwendung kommen kann und im 1. Halbjahr 2019 die ersten Proben untersucht werden können.
- AP5: Der TM-Messstand wurde mit einer Probe des D4 bestückt. Es zeigte sich bei diesen Untersuchungen, dass bei einer Deviatorspannung von 20 MPa das Material bereits bei $30 \text{ }^\circ\text{C}$ kriecht, obwohl es anstelle des Salzgruszuschlags mit einem Silikatzuschlag hergestellt wird. Eine Erhöhung der Temperatur auf $60 \text{ }^\circ\text{C}$ führte zu einer signifikanten Zunahme der Verformungen. Dieser Effekt wurde bei einer Temperatur von $80 \text{ }^\circ\text{C}$ nochmals verstärkt. Im Weiteren Ablauf soll an den folgenden Prüfkörpern die Deviatorspannung immer weiter gesenkt werden, um zu testen, ob mit diesem Versuchsaufbau Kriechversuche unter einem nahezu isotropen Spannungszustand durchgeführt werden können. Ziel ist es, Kriechversuche in einem annähernd isotropen Spannungszustand bei unterschiedlichen Temperaturen durchzuführen.
- AP6: Der Aufbau der THMC-Messstandes wird zurzeit konzipiert. Einzelne Komponenten wurden bei Herstellern angefragt und die Berechnung der Auslegung der Autoklaven wird Anfang 2019 abgeschlossen sein.
- AP7: –
- AP8: Erstellung der Dokumente zur Qualitätssicherung der Arbeiten im Projekt. Hierzu gehören die Standarddokumente Laborauftrag, Versuchsanweisungen und Versuchsplan. Des Weiteren erfolgte die Erstellung des HJB und JB.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Beschaffung der Probekörper (AP1) wird im nächsten Halbjahr abgeschlossen sein. Des Weiteren werden die Messstände für die HC- und THC-Messstände aufgebaut. Entsprechend des aufgestellten Versuchsplans werden die Versuche durchgeführt. Die Planungen für den Aufbau des THMC-Messstandes werden fortgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	Förderkennzeichen: 02 E 11708A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 206.313,00 EUR	Projektleiter: Dr. Czaikowski

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Experimentelle Untersuchungen

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

AP2: Gefügeuntersuchungen zum Prozessverständnis

Die Identifikation der während der Salzkompaktion ablaufenden Verformungsmechanismen und deren Quantifizierung sind wesentlich für das Prozessverständnis. Ausgehend von der Zielstellung, dass mit der Vorkonsolidierung im „Zeitraffer“ schon eine Probenporosität in der Größenordnung von ca. 10 % erreicht wird, ist zu dokumentieren, dass sich während der Vorkonsolidierung bei Wiederholung ein reproduzierbares Korngefüge einstellt, und dass u. a. keine unnatürlichen Gefügeveränderungen, z. B. durch Spannungskonzentrationen an Kontaktstellen, auftreten. Hierfür werden in (AP2.1) die Deformations- bzw. Porenraumgefüge der experimentell vorkompaktierten Proben untersucht und miteinander sowie mit technischen Analoga in (AP2.2) verglichen. Zur Beschreibung und für eine Quantifizierung des

Einflusses von Feuchtigkeit auf das Kompaktionsverhalten sollen in (AP2.3) die oben genannten Untersuchungsverfahren getestet und bzgl. ihres Potentials bewertet werden.

AP3: Modelltechnische Strategie

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

AP4: Dokumentation und Synthese

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum hat am 26. September 2018 das Kick-off Meeting in Braunschweig stattgefunden. Die DAEF-Stellungnahme zum Wissensstand hinsichtlich der Salzgruskompaktion legt nahe, dass die bestehenden Defizite nicht in einem Zweijahresprogramm behoben werden können. Es sollen jedoch im Rahmen des Vorhabens wichtige Voraussetzungen geschaffen und Strategien entwickelt werden, um diese Defizite abzubauen. Von den Konsortialpartnern wurden dazu erste Ansätze und Entwicklungen vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse des Treffens wurden zusammengefasst und in einer Telefonkonferenz mit den Kollegen von Sandia diskutiert. Es ist beabsichtigt im Jahr 2019 einen gemeinsamen Workshop mit den Kollegen des WEIMOS Vorhabens durchzuführen, um die Reiseaktivitäten der Amerikaner zu minimieren.

4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung der einzelnen APs entsprechend der Vorhabenbeschreibung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine	Förderkennzeichen: 02 E 11708B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B	
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018
Gesamtkosten des Vorhabens: 198.873,00 EUR	Projektleiter: Dr. Müller-Hoeppe

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Experimentelle Untersuchungen

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

AP2: Gefügeuntersuchungen zum Prozessverständnis

Die Identifikation der während der Salzkompaktion ablaufenden Verformungsmechanismen und deren Quantifizierung sind wesentlich für das Prozessverständnis. Ausgehend von der Zielstellung, dass mit der Vorkonsolidierung im „Zeitraffer“ schon eine Probenporosität in der Größenordnung von ca. 10 % erreicht wird, ist zu dokumentieren, dass sich während der Vorkonsolidierung bei Wiederholung ein reproduzierbares Korngefüge einstellt, und dass u. a. keine unnatürlichen Gefügeveränderungen, z. B. durch Spannungskonzentrationen an Kontaktstellen, auftreten. Hierfür werden in (AP2.1) die Deformations- bzw. Porenraumgefüge der experimentell vorkompaktierten Proben untersucht und miteinander sowie mit technischen Analoga in (AP2.2) verglichen. Zur Beschreibung und für eine Quantifizierung des

Einflusses von Feuchtigkeit auf das Kompaktionsverhalten sollen in (AP2.3) die oben genannten Untersuchungsverfahren getestet und bzgl. ihres Potentials bewertet werden

AP3: Modelltechnische Strategie

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

AP4: Dokumentation und Synthese

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum hat am 26. September 2018 das Kick-off Meeting in Braunschweig stattgefunden.

Bzgl. der modelltechnischen Strategie wurden Messergebnisse zusammengestellt und erste Anforderungen an die Modelle formuliert. Dabei handelt es sich um Anforderungen, die sich im Hinblick auf die Modellierung der Barrierefunktion von Salzgrus bei kleinen Porositäten ergeben. Diese Kenntnisse sollen in die Konzipierung der Versuche und die Bewertung der Modellansätze einfließen.

Mit der Nachrechnung des Laborversuchs TK031 der BGR wurde begonnen. Es wurde der Stoffmodellansatz C-WIPP und Hein genutzt. Für die erste Nachrechnung wurde die alte Parametrisierung genutzt, die auf den Versuchen von Korthaus basiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Weitere Bearbeitung des AP3 entsprechend der Vorhabenbeschreibung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Friederikenstr. 60, 04279 Leipzig		Förderkennzeichen: 02 E 11708C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 272.341,60 EUR	Projektleiter: Dr. Popp	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in insgesamt drei große Arbeitspakete:

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Als Voraussetzung für die experimentellen Arbeiten in AP1 wurden von den Partnern zunächst verschiedene Optionen für eine Salzgrusauswahl auf Basis von vorliegenden Arbeiten (u. a. REPOPERM 2) diskutiert, z. B. Schnittsalz aus dem Streckenvortrieb von unterschiedlichen Lokationen. Randbedingungen sind möglichst reproduzierbare Materialbedingungen bzgl. Korngrößenverteilung und Feuchtigkeit, mit der Möglichkeit bei Bedarf auch noch nach Jahren gleichwertiges Material beschaffen zu können. Deshalb wird ein synthetischer Salzgrus verwendet, der aus verschiedenen Salzgrusfraktionen des Streusalzlieferanten GSES Sondershausen besteht. Die aktuell zu beschaffende Menge umfasst 2 t Material (4 x 0,5 t BigBags), mit der von der TU BAF im ELSA-Vorhaben entwickelten Rezeptur mOBSM (ohne Überkorn), die von allen Partnern für die geplanten Kompaktionsversuche eingesetzt wird. Mit Blick auf eine möglichst zuverlässige Messung der Porosität des Salzgrus ist eine neue isostatisch wirkende Triaxialzelle für ca. 1,5 l Probenvolumen entwickelt worden, bei der neben der etablierten Messung des Zellölvolumens versuchsbegleitend noch die Ultraschallgeschwindigkeiten (V_p , V_s) und die Permeabilität (Gas, Salzlösung) bestimmt werden können. Als Teil von AP3 wurde mit der Parameterableitung für den BGR-Referenzversuch LZV TK 031, als Teil der Benchmark-Rechnungen begonnen. Er bietet die Basis zur Überprüfung der Vorgehensweise zur Parameterableitung und zur Optimierung der von IfG modifizierten Variante des Stoffansatzes C-WIPP.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die neuentwickelte isostatische Triaxialzelle ist in der Fertigung und wird voraussichtlich innerhalb der nächsten 3 Monate einsetzbar sein. Nach Lieferung der vorkonditionierten Salzgruscharge bis spätestens Ende März wird mit den Vorkompaktionsversuchen in der großen IfG-Versatzdruckzelle (Volumen ca. 160 l) begonnen, wobei Zielgröße eine Restporosität von 10 – 15 % ist. Dafür sind Mehrstufenversuche mit wechselnden Belastungs- und Kriechphasen von ca. 4 Wochen Dauer und Axialspannungen bis 20 MPa geplant. Aus dem kompaktierten Material werden bedarfsweise (auch für die anderen Partner) Prüfkörper hergestellt, die nach Vermessung und Bestimmung der erreichten Porosität in der neuen Zelle weiter konsolidiert werden.

Im Rahmen von AP2 sollen dem Partner Sandia kurzfristig zwei Prüfkörper aus dem Referenzsalzgrus mit unterschiedlichen Versuchsbedingungen (nach Kompaktion bei RT und ca. 100 °C mit jeweils $\sigma_{\max} = 20$ MPa) sowie mehrere Proben von in situ kompaktiertem Salzgrus bereitgestellt werden.

Für AP3 ist die Fortführung der Simulationsrechnungen für den BGR-Referenzversuch LZV TK 031 geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		Förderkennzeichen: 02 E 11708D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 219.111,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Düsterloh	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Testversuche mit Drucklagerungszelle zur radialsymmetrischen Kompaktion von Salzgrus unter behinderter Axialdehnung.

Numerische und analytische Reanalyse DEBORA-Triaxialversuch "TK-031" mit Analyse Stoffmodell CWIPP und Kennwertermittlung.

4. Geplante Weiterarbeiten

Vergleichende Berechnung ausgewählter Ödometerversuche, Modifikation Stoffmodell CWIPP, strukturierte Weiterentwicklung Stoffmodell mit Separierung elastischer Deformationsprozesse, viskoser Kompaktionsprozesse und viskoser Scherdeformationen, Erarbeitung eines geeigneten Laborversuchsprogramms zur separierten Ermittlung der verschiedenen Deformationsprozesse, Weiterentwicklung und Modifikation der Kompaktionszellen, Entwicklung und Verifikation einer Versuchstechnik zur Rekompaktion von Salzgrus, Durchführung ausgewählter Versuche an kompaktiertem Salzgrus.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11718A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2018 bis 30.09.2020	Berichtszeitraum: 01.10.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 378.246,00 EUR	Projektleiter: Herold	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Mit Projektstart Oktober 2018 begann die BGE TECHNOLOGY GmbH die Bearbeitung des AP1 (Literaturrecherche zu Ausbaukonzepten) und 2 (Herleitung und Zusammenstellung der Randbedingungen und Anforderungen).

Im Rahmen des AP1 wurden die bisherigen Arbeiten der BGE TECHNOLOGY GmbH bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH, mit Bezug zu Ausbausystemen für HAW-Endlager zusammengefasst. Hervorzuheben sind dabei die abgeschlossenen FuE-Vorhaben GENESIS (2007), ERATO (2010) und ANSICHT (2017). Im Vorhaben GENESIS wurden erstmals für generische Endlagerkonzepte in Tongestein Stabilitätsanalysen der Einlagerungsstrecken durchgeführt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde mit dem Vorhaben ERATO eine umfängliche Untersuchung der Endlagerkonzepte im Tongestein durchgeführt. Neben dem Grubengebäuelayout wurden auch erstmals erforderlichen Streckenquerschnitte definiert und mit dem Fokus auf betriebliche Anforderungen ein Ausbaukonzept erarbeitet. Dieses Konzept stützte sich auf die jahrzehntelange praktische Erfahrung des deutschen Steinkohlebergbaus. Alle Strecken sollten mit einem Verbund- bzw. Kombiausbau ausgestattet werden. Zusätzlich zu den betrieblichen Erfordernissen wurden im Vorhaben ANSICHT langzeitsicherheitsrelevante Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht. Aus der Vielzahl wirkender thermischer, mechanischer, hydraulischer, chemischer und auch biologischer Einwirkung ist im Zusammenhang mit dem Streckenausbau die Gasbildung infolge von Korrosionsprozessen hervorzuheben. In einem Endlager für radioaktive Abfälle können bei Anwesenheit von Wasser und gasbildenden Stoffen durch unterschiedliche Prozesse daraus Gase, darunter vor allem Wasserstoff, gebildet werden. Im FuE-Vorhaben ANSICHT wurde das Ausbaukonzept weiterentwickelt, um den Stahlanteil im Endlager soweit möglich zu reduzieren. Vom zuvor favorisierten Kombiausbau mit Gleitbögen wurde deshalb für alle Strecken ein betonbasierter Ausbau berücksichtigt. Langlebige Strecken sollen mit einem mehrschaligen Betonausbau in Spritzbeton- und Ortbetonbauweise ausgestattet werden. Kurzlebige Strecken, wie beispielsweise Einlagerungsstrecken, können auch mit einem einschaligen Anker-Spritzbeton-Verbundausbau gesichert werden. Eine Neukonzeption der Streckenprofile wie auch weiterführende Stabilitätsuntersuchungen wurden damals nicht durchgeführt.

Im Rahmen des AP2 wurde begonnen die unterschiedlichen Anforderungen an das Ausbausystem zusammenzufassen. Anforderungen ergeben sich aus regulativen, betrieblichen, geomechanisch/geologischen, hydraulischen, chemischen sowie langzeitsicherheitsrelevanten Aspekten.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Die Herleitung und Zusammenstellung der Randbedingungen und Anforderungen wird fortgeführt und soll im folgenden Berichtszeitraum abgeschlossen werden.
- AP3 bis 5: Beginn der Arbeiten im anstehenden Berichtszeitraum.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: DMT GmbH & Co. KG, Am Technologiepark 1, 45307 Essen		Förderkennzeichen: 02 E 11718B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2018 bis 30.09.2020	Berichtszeitraum: 01.10.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 272.458,00 EUR	Projektleiter: Dr. te Kook	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Mit Vorhabenbeginn im Oktober 2018 führte die DMT GmbH & Co. KG im Rahmen des AP1 eine Literaturrecherche zu bestehenden nationalen und internationalen Ausbaukonzepten für HAW-Endlager, Verkehrstunnel und Grubenbauen im Tongestein sowie zu potenziell geeigneten alternativen Ausbaumaterialien zu klassischem Stahl und Beton durch.

Konsolidierte Tonsteine in Frankreich und in der Schweiz bzw. plastische Tone wie der belgische Boom-Clay werden bereits als potenzielles Wirtsgestein für die Endlagerung Wärme entwickelnder, hoch radioaktiver Abfälle untersucht. Die Teufen der Wirtsgesteine in Belgien und in der Schweiz liegen jedoch noch oberhalb der für Deutschland vorgesehenen Mindestteufe eines Endlagers von 300 m. Nur im französischen Bure existiert eine Versuchseinrichtung in etwa 500 m Teufe.

Trotz der geringen Teufe von rd. 220 m wird wegen der Plastizität des Boom-Clay in Belgien ein geschlossener starrer Betonpaneelausbau eingesetzt. Die Strecken im schweizerischen Felslabor, das im Opalinuston in rd. 300 m Teufe steht, sind in sohloffener Ankerspritzbetonbauweise erstellt. Im untertägigen Forschungslabor Bure (Teufe rd. 500 m) wurden verschiedenen Ausbautechniken, wie nachgiebige Bögen in Kombination mit einer Betonhinterfüllung eingesetzt. Zusätzlich wurde ein Sohlgewölbe zu Verminderung der Sohlenhebung eingebracht.

Ankerspritzbeton und insbesondere baustoffhinterfüllte Gleitbögen sind Standardausbausysteme im Gewinnungsbergbau. Ein Sohlenschluss ist im Gewinnungsbergbau weniger verbreitet. Gebirgsbewegungen aus der Sohle werden bewusst zugelassen und können durch Senkarbeiten ohne betriebliche Schwierigkeiten beseitigt werden. Für besonders zu schützende Bauwerke mit hoher Lebensdauer (z. B. Füllörter) in gebirgsmechanisch höchst beanspruchten Zonen wurde bereits 1987 ein geschlossenes, begrenzt nachgiebiges Ausbausystem mit hoher Tragkraft (1000 kN/m²) auf dem Bergwerk Ibbenbüren in 1400 m Teufe erfolgreich eingesetzt (Haecker 1987).

Beim Tunnelbau im Tongestein hingegen werden im Wesentlichen starre geschlossene Ausbausysteme verwendet. Beispielhaft sei hier der Belchentunnel genannt. Unter anderem zur Beherrschung von Quelldrücken besteht der Außenausbau aus 35 cm starken Betontübingen und das Innengewölbe aus einer Betonschale von mindestens 40 cm (Chiaverio 2018).

Als Materialien für Ausbausysteme werden im Berg- und Tunnelbau üblicherweise Stahl, Beton, Stahlbeton oder mit Fasern verstärkter Beton eingesetzt.

In Endlagerkonzeptionen wird ein Ausbau mit möglichst geringem Stahlanteil bevorzugt. Der verwendete Baustoff soll zudem einen niedrigen pH-Werte aufweisen.

In Schweden wurden sogenannte low-pH-Baustoffe entwickelt (SKB, 2009). Die Reduktion des pH-Wertes wird durch den Ersatz von 40 Gew.-% des Zements durch Silikatstaub erreicht. Der Einsatz von Silikastäuben erfordert jedoch in der Regel höhere Anforderungen an die Einbauqualität und die Maßnahmen zum Gesundheitsschutz der Mitarbeiter.

Eine weitere Alternative zu herkömmlichen Betonen ist der Polymerbeton. Er besteht zum überwiegenden Teil aus natürlich vorkommenden mineralischen Rohstoffen, wie z. B. Quarz, Basalt und Granit. Sie werden in Form von Sanden und Kiesen mit einer Kunstharzmatrix gebunden. Polymerbetone haben deutlich höhere Festigkeiten als herkömmliche Betone.

Im Rahmen einer weiterführenden Recherche sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Organika wie z. B. Polymerbeton ausgelotet werden.

Im Rahmen des AP2 wurde begonnen, die unterschiedlichen Anforderungen an das Ausbausystem zusammenzufassen. Anforderungen ergeben sich aus regulativen, betrieblichen, geomechanisch/geologischen, hydraulischen, chemischen sowie langzeitsicherheitsrelevanten Aspekten. Hierzu die DMT begonnen, geomechanische Parameter von Tongestein zusammenzutragen und tabellarisch aufzuarbeiten.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: Die Herleitung und Zusammenstellung der Randbedingungen und Anforderungen wird fortgeführt und soll im folgenden Berichtszeitraum abgeschlossen werden.

AP3 bis 5: Beginn der Arbeiten im anstehenden Berichtszeitraum.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11728
Vorhabensbezeichnung: Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallingestein (KOREKT)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2018 bis 30.06.2020	Berichtszeitraum: 01.11.2018 bis 31.12.2018	
Gesamtkosten des Vorhabens: 344.016,00 EUR	Projektleiter: Herold	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Mit Projektstart begannen die Arbeiten am AP1 (Grundlagen für eine selektive Rückholung). Für alle Untersuchungen zur Rückholbarkeit von Behältern gilt, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht bekannt ist, aus welchen Gründen eine Rückholung erforderlich sein wird. Damit sind auch die genauen Randbedingungen zum Rückholungszeitpunkt ungewiss. Im Rahmen des FuE-Vorhabens ERNESTA wurde für die Erarbeitung geeigneter Rückholungskonzepte angenommen, dass eine Rückholung zum spätesten möglichen Betriebszeitpunkt erfolgt. Das bedeutet, dass alle Behälter bereits planmäßig eingelagert und versetzt sind. Die Hauptstrecken sind ebenso verfüllt und durch Streckenverschlüsse verschlossen. Zum spätesten möglichen Rückholungsbeginn stehen also nur noch wenige Grubenbaue des Infrastrukturbereiches und die Schächte zur Verfügung. Diese Annahme deckt eine Vielzahl möglicher Rückholungsszenarien ab. Eine selektive Rückholung wurde daher nicht gesondert betrachtet. Im Rahmen des AP1 wird untersucht, wie eine selektive Rückholung in der Konzeptentwicklung berücksichtigt werden kann. Dabei ist zunächst zu klären, was unter „selektiver Rückholung“ zu verstehen ist. Hier sind verschiedene Varianten/Szenarien möglich, wie beispielsweise die Rückholung einzelner Abfallgruppen, aller Endlagerbehälter eines Einlagerungsfeldes oder aber eines einzelnen Behälters. Unterschiede ergeben sich auch für die zu betrachtenden Einlagerungskonzepte. Im Konzept multipler ewG beispielsweise, sind Einlagerungsfelder räumlich voneinander getrennt und erleichtern eine selektive Rückholung einzelner Felder.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Die Arbeiten werden im folgenden Berichtszeitraum abgeschlossen.

AP2 + 3: Die Bearbeitung beider APs beginnt mit dem neuen Berichtszeitraum. Ziel ist es, ein geeignetes Rückholungskonzept für das Einlagerungskonzept „multipler ewG“ zu entwickeln. Parallel wird das Systemverhalten innerhalb eines vertikalen Einlagerungsbohrloches untersucht, um die Bedingungen zur Rückholung und wirkenden Kräfte beim Ziehen der Kokillen besser beurteilen zu können.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

2.2 Vorhaben Bereich 6

Information zu Publikationen sowie zu Aus- und Weiterbildung

In den Halbjahresberichten werden in kurzgefasster Form die Ergebnisse der aktuell bewilligten Forschungsvorhaben dargestellt. Vorhabenrelevante Publikationen werden aufgelistet, soweit es der Platz zulässt, es ist aber nicht immer möglich alle im Rahmen eines FuE-Vorhabens erfolgten Veröffentlichungen (schriftlich oder mündlich) aufzunehmen. Ferner sind Informationen zur Aus- und Weiterbildung wissenschaftlichen Nachwuchses bei den Forschungseinrichtungen nicht explizit abgefragt und ausgewiesen worden.

Es wurde daher beginnend mit dem Jahr 2015 vereinbart, zukünftig Angaben zur Gesamtzahl der Publikationen und zu Ausbildungsaspekten zu machen. Die entsprechenden Daten werden von den Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt.

Die zusammenfassende Darstellung erfolgt im jeweils zweiten Halbjahresbericht eines Kalenderjahres. Damit soll zusätzlich zur Kurzdarstellung der Vorhabenergebnisse in den Fortschrittsberichten dokumentiert werden, dass und wie die FuE-Ergebnisse verbreitet werden.

Publikationen

Im Jahr 2018 erfolgten in rund 130 Veröffentlichungen in begutachteten Journalen, in Form von Schlussberichten, Doktor-, Master-, Bachelor- und Studienarbeiten oder in sonstiger schriftlicher Form die Publikation von Ergebnissen von FuE-Vorhaben durch die geförderten Forschungseinrichtungen.

Zudem wurden im Jahr 2018 rund 100 Vorträge auf Konferenzen, bei Workshops und sonstigen Veranstaltungen gehalten und Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse präsentiert.

Aus- und Weiterbildung

Ein strategisches Forschungsziel der BMWi-Förderung ist die Bereitstellung von Expertise und Wissen, der Erhalt und Ausbau wissenschaftlich-technischer Kompetenz und als wichtiges Element dafür die Unterstützung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Die Aus- und Weiterbildung von Post-Docs, Doktoranden, Masterstudenten erfolgt nahezu ausschließlich durch Universitäten und Einrichtungen der Helmholtz Gemeinschaft. Gleichwohl erfolgt in einzelnen Fällen die Ausbildung und Finanzierung wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation zwischen Universitäten und Unternehmen.

Im Jahr 2018 waren in den hier aufgeführten FuE-Vorhaben 73 Nachwuchswissenschaftler in FuE-Vorhaben eingebunden.

3 Verzeichnis der Forschungsstellen

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Unter den Linden 87, 12205 Berlin
--

- | | | |
|------------|---|-----|
| 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 | 124 |
| 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 |

BGE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine
--

- | | | |
|-------------|---|-----|
| 02 E 11193B | Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen | 46 |
| 02 E 11294 | Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (ERNESTA) | 50 |
| 02 E 11385 | Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA) | 72 |
| 02 E 11486B | Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B | 116 |
| 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 | 122 |
| 02 E 11577A | Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A | 138 |
| 02 E 11617A | Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt A | 154 |
| 02 E 11658B | Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt B | 170 |

- 02 E 11678** Untersuchungen zur Vervollständigung von Stoffmodellen für Salz- oder Sorelbeton sowie spezieller low-ph und hochdichter bzw. hochfester Betone zum rechnerischen Nachweis der Rissbeschränkung für Bauwerke (UVERSTOFF) 📖 178
- 02 E 11708B** Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B 📖 186
- 02 E 11718A** Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A 📖 192
- 02 E 11728** Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallgestein (KOREKT) 📖 196
- DMT GmbH & Co. KG, Am Technologiepark 1, 45307 Essen**
- 02 E 11718B** Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B 📖 194
- Dr. Andreas Hampel, Grünberger Str. 56, 55129 Mainz**
- 02 E 11446A** Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt A 📖 94
- Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich**
- 02 E 11607D** Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt D 📖 152
- Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., München**
- 1501576** ProCast - Probalistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen 📖 34
- 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 Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt C 📖 130
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Schwertnergasse 1, 50667 Köln**
- 02 E 11284** Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld (BIGBEN) 📖 48
- 02 E 11304** Tonforschung im Untertagelabor Mont-Terri 📖 52
- 02 E 11314** Ermittlung der Stabilitätsbandbreiten redoxdeterminierender eisenhaltiger Korrosionsphasen (KORPHA) 📖 54
- 02 E 11334A** Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt A 📖 56

- 02 E 11344A Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt A  60
- 02 E 11365 Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)  70
- 02 E 11456B Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e²), Teilprojekt B  106
- 02 E 11466 Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)  108
- 02 E 11476A Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A  110
- 02 E 11486A Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A  114
- 02 E 11496A Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt A  118
- 02 E 11567B Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH²M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt B  136
- 02 E 11577B Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B  140
- 02 E 11587B Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt B  144
- 02 E 11607A Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A  146
- 02 E 11617B Verbundprojekt: Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA II), Teilprojekt B  156
- 02 E 11627 Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)  158
- 02 E 11647 Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)  166
- 02 E 11658A Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt A  168
- 02 E 11668A Verbundprojekt: Smart-K_d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt A  172

- 02 E 11698** Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwirkungen auf zementbasierte Dichtelemente (THYMECZ)  182
- 02 E 11708A** Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt A  184
- RS1552** Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung  36
- RS1553A** Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung („ProbBau“)  38
- RS1563** Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern  40

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  58
- 02 E 11344B** Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt B  62
- 02 E 11415B** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B  76
- 02 E 11607B** Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B  148
- 02 E 11668B** Verbundprojekt: Smart- K_d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B  174

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  162

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 11446B Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B 📖 96
- 02 E 11708C Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C 📖 188

Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstraße 21, 55122 Mainz

- 02 E 11415A Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A 📖 74

Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main

- 02 E 11476B Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt B 📖 112

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

- 02 E 11355 Eine experimentelle Analyse der Verhandlungen um ein Endlager für radioaktive Abfälle (Expander) 📖 68
- 02 E 11587A Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt A 📖 142
- 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 📖 164

Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover

- 02 E 11446C Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt C 📖 98
- 1501560 Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK) 📖 30

Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg

- 02 E 11547A Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt A 📖 126

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Seminarstr. 2, 69117 Heidelberg

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

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

- 02 E 11415C Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt C 📖 78

- 02 E 11547B** Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit sozio-technischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B 📖 128
- 02 E 11456A** Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e^2), Teilprojekt A 📖 104
- 02 E 11496B** Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt B 📖 120
- 02 E 11607C** Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C 📖 150
- 02 E 11668C** Verbundprojekt: Smart- K_a in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C 📖 176

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 📖 44
- 02 E 11435** MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von $MgCl_2$ -Lösung (MgO-SEAL) 📖 92
- 02 E 11557** Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GESAV II) 📖 132

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 📖 100

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) 📖 90
- 02 E 11446E** Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E 📖 102
- 02 E 11567A** Verbundprojekt: Internationales Benchmarking zur Verifizierung und Validierung von TH²M-Simulatoren insbesondere im Hinblick auf fluiddynamische Prozesse in Endlagersystemen (BenVaSim), Teilprojekt A 📖 134
- 02 E 11688** Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III) 📖 180
- 02 E 11708D** Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D 📖 190

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 | 📖 160 |
|-------------|--|-------|

Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden
--

- | | | |
|-------------|---|------|
| 02 E 11415G | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G | 📖 86 |
| 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 strahlungsbasierten und thermographischen Messverfahren | 📖 22 |

Technische Universität Kaiserslautern, Gottlieb-Daimler-Straße, 67663 Kaiserslautern

- | | | |
|----------|--|------|
| 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 |

Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München
--

- | | | |
|-------------|--|------|
| 02 E 11344D | Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt D | 📖 66 |
| 02 E 11415E | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt E | 📖 82 |

Universität des Saarlandes, Campus Saarbrücken, 66123 Saarbrücken
--

- | | | |
|-------------|--|------|
| 02 E 11415D | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D | 📖 80 |
|-------------|--|------|

Universität Greifswald, Domstr. 11, 17489 Greifswald

- | | | |
|-------------|--|------|
| 02 E 11344C | Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilproject C | 📖 64 |
|-------------|--|------|

Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam

- | | | |
|-------------|--|------|
| 02 E 11415F | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F | 📖 84 |
|-------------|--|------|