

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

PTE Nr. 57

BMW geförderte FuE-Vorhaben zur
„Entsorgung radioaktiver Abfälle“

Berichtszeitraum: 1. Januar - 30. Juni 2019

Projekträger Karlsruhe (PTKA)
Entsorgung

November 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>15</i>
1.6	<i>Kernmaterialüberwachung.....</i>	<i>17</i>
2	Formalisierte Zwischenberichte	19
2.1	VORHABEN BEREICH 1	19
2.2	VORHABEN BEREICH 2 bis 5	45
2.3	VORHABEN BEREICH 6	209
	Information zu Publikationen sowie zu Aus- und Weiterbildung.....	211
3	Verzeichnis der Forschungsstellen.....	213

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	📖 20
1501510	Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (StrukElast)	TU Dresden	📖 22
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	📖 24
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	📖 26
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	📖 28
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	📖 30

1501560	Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK)	Leibniz Universität Hannover	📖 32
1501561	Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin	📖 34
1501576	ProCast - Probalistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., München	📖 36
RS1552	Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 38
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	📖 40
RS1563	Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 42

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 | 📖 150 |
| 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 | 📖 152 |
| 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) | 📖 154 |

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	📖 46
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	📖 48
02 E 11385	Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA)	BGE Technology GmbH, Peine	📖 64
02 E 11435	MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl ₂ -Lösung (MgO-SEAL)	Technische Universität Bergakademie Freiberg	📖 82
02 E 11527	Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoB-ra), Teilprojekt A	BGE Technology GmbH, Peine	📖 112
02 E 11537	Verbundprojekt: Anforderungen und Konzepte für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoB-ra), Teilprojekt B	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin	📖 114
02 E 11557	Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GE-SAV II)	Technische Universität Bergakademie Freiberg	📖 122
02 E 11577A	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A	BGE Technology GmbH, Peine	📖 128
02 E 11587A	Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt A	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 132
02 E 11587B	Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt B	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 134

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	📖 144
02 E 11627	Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 148
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	📖 168
02 E 11688	Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III)	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 170
02 E 11698	Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwirkungen auf zementbasierte Dichtelemente (THYMECZ)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 172
02 E 11708A	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 174
02 E 11708B	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B	BGE Technology GmbH, Peine	📖 176
02 E 11708C	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig	📖 178
02 E 11708D	Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 180
02 E 11718A	Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A	BGE Technology GmbH, Peine	📖 182
02 E 11718B	Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B	DMT GmbH & Co. KG, Essen	📖 184
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	📖 186
02 E 11748A	Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt A	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 188

- | | | | |
|--------------------|---|---|-------|
| 02 E 11748B | Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden | 📖 190 |
| 02 E 11749 | Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (TREND) | BGE Technology GmbH, Peine | 📖 192 |
| 02 E 11769A | Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A | Technische Universität Bergakademie Freiberg | 📖 200 |
| 02 E 11769B | Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt B | Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden | 📖 202 |
| 02 E 11779 | MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz, Qualitätssicherung mit Ultraschall (MgO-S3) | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin | 📖 204 |

1.4 Sicherheitsnachweis

02 E 11284	Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld (BIGBEN)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 50
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 11334B	Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden	📖 56
02 E 11344A	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 58
02 E 11344D	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt D	TU München	📖 60
02 E 11365	Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 62
02 E 11415A	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A	Johannes-Gutenberg Universität Mainz	📖 66
02 E 11415B	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Dresden	📖 68
02 E 11415C	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt C	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen	📖 70
02 E 11415D	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D	Universität des Saarlandes, Saarbrücken	📖 72

02 E 11415E	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt E	TU München	📖 74
02 E 11415F	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F	Universität Potsdam	📖 76
02 E 11415G	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G	TU Dresden	📖 78
02 E 11415H	Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt H	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg	📖 80
02 E 11446A	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt A	Dr. Andreas Hampel, Mainz	📖 84
02 E 11446B	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt B	IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig	📖 86
02 E 11446C	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt C	Leibniz Universität Hannover	📖 88
02 E 11446D	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt D	TU Carolinense zu Braunschweig	📖 90
02 E 11446E	Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld	📖 92
02 E 11456A	Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e^2), Teilprojekt A	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldshafen	📖 94
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	📖 96
02 E 11466	Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	📖 98

02 E 11476A	Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 100
02 E 11476B	Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt B	Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main	 102
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	 104
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	 106
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	 108
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	 110
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	 124
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	 126
02 E 11577B	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 130
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	 136
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.	 138

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	 140
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	 142
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 An- lagen- und Reaktor- sicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 146
02 E 11647	Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)	Gesellschaft für An- lagen- und Reaktor- sicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 156
02 E 11658A	Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt A	Gesellschaft für An- lagen- und Reaktor- sicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 158
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	 160
02 E 11668A	Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt A	Gesellschaft für An- lagen- und Reaktor- sicherheit (GRS) gGmbH, Köln	 162
02 E 11668B	Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	 164
02 E 11668C	Verbundprojekt: Smart-K _d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein- Leopoldshafen	 166
02 E 11759A	Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt A	Friedrich-Schiller- Universität Jena	 194
02 E 11759B	Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt B	Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein- Leopoldshafen	 196

02 E 11759C Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-
Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der
Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit -
Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt C

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

 198

1.5 Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen

- | | | | |
|--------------------|--|--|-------|
| 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. | 📖 116 |
| 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 | 📖 118 |
| 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 | 📖 120 |
| 02 E 11789 | Wegemanagement bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland (WERA) | Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V. | 📖 206 |

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: 01.01.2019 bis 30.04.2019	
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

Metалldichtungen (M):

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

Elastomerdichtungen (E):

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

Polyethylen zur Neutronenabschirmung (P):

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Vorhaben endet zum 30.04.2019

4. Geplante Weiterarbeiten

Keine.

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: 01.01.2019 bis 30.04.2019	
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 Werkstoffeigenschaften bereitgestellt werden.

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Vorhaben endet zum 30.04.2019.

4. Geplante Weiterarbeiten

Keine.

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 31.07.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

- AP2: Die Recherchen zur Detektortechnologie mit Bezug auf die Myonenbildgebung wurden fortgeführt. Ein Schema für die Rekonstruktion der Brennelemente wurde erstellt, wofür die Brennelemente in 380 Kontrollvolumina diskretisiert wurden. Die Arbeiten zeigten, dass für eine Rekonstruktion nach diesem Schema die Lösung eines schlecht konditionierten linearen Gleichungssystems erforderlich wäre. Es besteht weiterer Forschungsbedarf.
- AP5: Als geeignetste Detektortechnologie haben sich die Straw Tube Tracker herausgestellt. Für einen existierenden Detektor dieses Typs vom Forschungszentrum Jülich wurde ein COMSOL-Simulationsmodell erstellt. Für die Geometrie einer einzelnen Tube wird die Teilcheninteraktion simuliert um die Randbedingungen für eine geeignete Detektorelektronik zu bestimmen.
- AP6: Die thermographischen Messungen am Modellbehälter an der Hochschule Zittau-Görlitz wurden wiederholt. Ein erneuter Vergleich mit den Simulationsergebnissen zeigte eine verbesserte Übereinstimmung zwischen den ermittelten Temperaturen in Simulation und Experiment.
- AP10: Das Messkonzept wurde weiter überarbeitet. Neben der Thermographie wird jetzt auch auf die Anwendung der akustischen Verfahren verzichtet. Gründe hierfür sind deren geringe Sensitivität sowie vielfältige Möglichkeiten der Überlagerung des relevanten Informationsgehalts.

4. Geplante Weiterarbeiten

Fertigstellung des Abschlussberichts.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum wurde 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: recent results"; 3rd Workshop on Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel (SEDS); GRS gGmbH, Garching, Deutschland; Juni 2019

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 31.07.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

- AP7: In weiterführenden Literaturrecherchen sowie im Rahmen von Expertengesprächen wurde die Wichtigkeit eines (möglichst) nicht-invasiven Monitoring des Behälterinventars nochmals unterstrichen. Nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik lassen sich Schädigungen an den Brennelement-Hüllrohren nach verlängerten Lagerzeiten nicht vollständig ausschließen. Ein Online-Monitoring-Verfahren würde den Nachweis der Integrität der Brennelemente deutlich vereinfachen.
- AP8: Die Auswertungen der durchgeführten Experimente zu den Messmethoden Gammastrahlung und Thermographie wurden vervollständigt.
- AP9: In einem finalen Experiment zur Messmethode Schallemissionsanalyse wurde der Einfluss des entweichenden Gasvolumens beim Hüllrohrversagen auf den zeitlichen Verlauf sowie die Amplitude des resultierenden Schalldrucks untersucht. Die Messergebnisse bestätigen einen Einfluss des Gasvolumens auf den zeitlichen Verlauf. Die Schallamplitude scheint hingegen nicht vom entweichenden Gasvolumen abhängig zu sein. Die Auswertung sowie die Zusammenstellung der Ergebnisse der Versuche zur aktiven und passiven Schwingungsspektroskopie wurden abgeschlossen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Fertigstellung des Abschlussberichts.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Kratzsch A. et al.; “Investigations on potential methods for the long-term monitoring of the state of fuel elements in dry storage casks: recent results”; 3rd Workshop on Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel (SEDS); GRS gGmbH, Garching, Deutschland; Juni 2019

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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: Es wurden die Sugano-Testreihe (Klein- und Großversuche) sowie die Meppen- (verformbar und starr) und UKAEA-Versuche aufgearbeitet und numerisch analysiert. Die Sugano-Großversuche wurden mit vereinfachten Zylinderschalenmodellen, aber auch mit einem komplexen Triebwerksmodell (GRS) simuliert. Untersuchte Parameter und Einflussfaktoren waren der Einfluss der Netzfeinheit, die Kopplung von Beton mit der Bewehrung sowie die Materialmodelle RHT und R72 (Karagozian&Case). Hinsichtlich der UKAEA-Versuche (harter Impakt) konnten unter Einsatz des RHT-Betonmodells gute Übereinstimmungen im Schadensbild im Vergleich mit den Experimenten festgestellt werden. Weiterhin konnte mit den UKAEA und Meppen Versuchen nachgewiesen werden, dass die Aufprallgeschwindigkeit und die Plattendi-

cke von harten Projektilen einen Einfluss auf die Form des Durchstanzkegels haben. Die Erkenntnisse wurden für die Weiterentwicklung des Mehrmassenschwingers genutzt.

- AP2: Basierend auf den Parameterstudien und Validierungen aus den vorherigen Berichtszeiträumen wurden zur Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung die absorbierenden PML-Elemente kalibriert (Elementgröße, Schichtdicke, Abstand zur Anregungsquelle) und für eine numerische nichtlineare Zeitverlaufsberechnung eingesetzt. Untersucht wurden die Auswirkungen der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung auf Etagenantwortspektren eines Kernkraftwerks von induzierten Erschütterungen infolge eines Flugzeuganpralls. Es wurde nachgewiesen, dass die Beschleunigungen bei Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung extrem ansteigen und, dass die Erschütterungen über die Fundamentplatte und den Boden übertragen werden. Erste Analysen zeigen, dass die Erschütterungen bei der Modellierung des Bodens mittels approximierten frequenzunabhängigen Federn gegenüber einer genaueren Berechnung mit PML-Elementen unterschätzt werden. Die Anwendung der PML-Elemente weist eine hervorragende Absorption der sich ausbreitenden Wellen auf.
- AP3: Zur numerischen Bestimmung der lokalen Grenztragfähigkeit infolge des Aufpralls von Turbinen des Triebwerktyps GE-J79 (Sugano Großversuche) sowie weiterer Zweistrom-Strahltriebwerke (Passagierflugzeuge) auf Betonstrukturen wird das Verhalten der Triebwerks- welle und deren Perforationspotential untersucht.
- AP4: Im Rahmen der Teilnahme am IRIS 3 Benchmark wurden für die Phase B (Kalibrierung der Berechnungsmodelle unter Verwendung der experimentellen Ergebnisse) Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. 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.
- AP5: Für eine ganzheitliche und gekoppelte Untersuchung des Lastfalls Turbinenaufprall auf ein Zwischenlager werden aufeinander abgestimmte 3D-Berechnungsmodelle von Turbinen und Gebäuden entwickelt und mit verschiedenen Methoden verifiziert. Das STEAG Konzept soll aufgrund der massiveren konstruktiven Umsetzung bereits einen Beitrag zur Sicherung der Castor-Behälter vor einem Flugzeugabsturz leisten und wurde aus diesem Grund für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Aufgrund der Komplexität und des hohen Rechenaufwands wurde ein Ansatz entwickelt, der eine Kombination aus 3D-Volumenelementen (Solids) und Schalenelementen beinhaltet. Der Anprallbereich der Zwischenlageroberfläche wird diskret modelliert, um die lokalen plastischen Effekte abzubilden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Weitere Triebwerksmodelle (z. B. TF-30) sollen erstellt und getestet werden, um die Auswertungs- und Ergebnisgrundlage zu vergrößern.
- AP2: Die Verifikation der komplexen Analyse des Kernkraftwerks soll für die elastische Berechnung mit der TML-Methode fortgeführt werden.
- AP3: Die gewonnenen numerischen Daten sollen mit den Ergebnissen der existierenden und bereits programmtechnisch erfassten empirischen Formeln verglichen werden.
- AP4: Das Nachschwingverhalten der getroffenen Mockup-Vorderseite soll weiter verbessert werden. Geplante Weiterarbeiten sind die Variation des Materialmodells (Beton) sowie der Netzfeinheit.
- AP5: Die entwickelten Turbinenmodelle sollen unter Berücksichtigung einer deformierbaren Masse weiter verifiziert und Fallbeispiele mit Modellen von Zwischenlagern und Turbinen 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 245.580,20 EUR	Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Glock	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

Das AP3 des Verbundarbeitsplans wird ausschließlich durch den Verbundpartner bearbeitet.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP4: Aufbauend auf den bisher vorliegenden Ergebnissen aus Versuchen an prismenförmigen, kleinmaßstäblichen Probekörpern wurde eine zylindrische Schalung für weitere Versuche entwickelt. Die mit der Schalung hergestellten Probekörper wurden ebenfalls getestet und der Einfluss der Probengeometrie auf die Tragfähigkeit ermittelt. Dabei wurden sowohl Versuchskörper aus einer Betonmischung als auch Versuchskörper aus unterschiedlichen Betonen verwendet.
- AP5: Die Literaturrecherche wurde mit Fokus auf das Potential der Berücksichtigung von Monitormaßnahmen bei der Nachrechnung von Bestandsbauwerken, insbesondere von Zwischenlagern, fortgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Durchführung weiterer Untersuchungen zum Einfluss von Zuschlagsgröße, Zuschlagsart, Belastungsgeschwindigkeit und Maßstabeffekt unter Zuhilfenahme u. a. von FE-Methoden sowie Weiterentwicklung des Updating-Verfahrens für Bauwerksstrukturen mit großen Querschnitten.
- AP5: Konkretisierung der Herangehensweise zur Berücksichtigung von Monitoring bei der Nachrechnung von Zwischenlagern.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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: Die Literaturrecherche wurde mit Fokus auf aktuelle Ergebnisse zur Wasserstoffbeladung, Wasserstoffversprödung und der zeitlichen Entwicklung der Hüllrohreigenschaften während der Lagerung fortgeführt.
- AP2: Die Versuchseinrichtung zur Wasserstoffbeladung wurde verbessert, um den Beladungsdruck zuverlässiger aufrecht erhalten zu können. Im Anschluss wurden Beladeversuche bei Beladungsdrücken von 9 bar und 18 bar an den Werkstoffen Zry2 und Zr702 (Versuchstemperatur: 250 °C) zur Ermittlung der sich einstellenden Beladegeschwindigkeiten durchgeführt. Diese erwiesen sich dabei als relativ linear abhängig von der Beladezeit. Die schnellere Beladung konnte bei 18 bar erreicht werden. Im Vergleich zur Literatur stellten sich die erreichten Wasserstoffbeladungen bei geschliffenen und ungeschliffenen Proben als allgemein hoch heraus, wobei geschliffene Proben eine höhere Beladung erreichten als ungeschliffene. Man kann davon ausgehen, dass dies auf die relativ zum Betrieb dünne Oxidschicht auf der Oberfläche der (ungeschliffenen) Proben zurückzuführen ist. Weiterhin nahm Zr702 eine höhere Menge Wasserstoff auf als Zry2 im gleichen Zeitraum. Die in den Versuchen entstandenen Hydride weisen eine sehr feine Verteilung auf. Massivere Hydridplatten sind selten, was ebenfalls konträr zu den vorliegenden Ergebnissen aus der Literatur steht. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die vergleichsweise niedrige Beladungstemperatur von 250 °C darstellen. Weitere Voruntersuchungen befassten sich mit der Auswahl optimaler Präparationstechniken und Bildgebungsverfahren für die Analyse der Hydride.
- AP3: Im Rahmen der Modellexperimente sollen die Temperatur- und Druckverläufe unter Lagerbedingungen nachempfunden werden. Hierfür wurde ein geeigneter Rohrprüfstand entwickelt, gefertigt und montiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Kontinuierliche Fortführung der Literaturrecherche
- AP2: Vertiefte Analyse der erhaltenen feinen Hydride sowie Herstellung von Zircaloyproben, welche als Ausgangsproben für die Zeit-Druck-Temperaturfolgen verwendet werden können.
- AP3: Durchführung eines Drucktests am fertig gestellten Prüfstand sowie Festlegung des Versuchsprogramms.
- AP5: Untersuchungen zur Analyse der Veränderung der Eigenspannungen im Zircaloy während verschiedener Stadien der Versuchsdurchführung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Bongartz, B. et al.; „Investigation of the temporal rearrangement behavior of zirconium hydride precipitates in interim and final storage; 3rd Workshop on Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel; Garching, Deutschland, Juni 2019

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 Versagenskriteriums 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 wurde abgeschlossen.
- AP2: Das im letzten Berichtszeitraum entwickelte Modell wurde um ein versagendes radiales Hybrid erweitert. Dazu wurde auf die aus der Bruchmechanik bekannte Modellierung der Rissbildung unter Verwendung von Kohäsivzonen zurückgegriffen. Das Bruchverhalten wird dabei durch eine vorzugebende konstitutive lokale Kohäsivkraft-Verschiebungskurve bestimmt, für die zur Beschreibung der Experimente ein geeigneter Verlauf gefunden wurde. Ein eintretendes Versagen in Form eines Sprödbruchs äußert sich durch einen plötzlichen Kraft-Abfall in der simulierten globalen Kraft-Verschiebungskurve des Experiments (Ring Compression Test). Die Höhe des Kraftabfalls wird von der Länge des modellierten radialen Hybrids beeinflusst.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Fortsetzung der numerischen Analyse des Festigkeitsverhaltens im Ring-Compression-Test (RCT) unter Variation der Eigenschaften des angenommenen radialen Hybrids sowie Erweiterung des Modells um weitere (radiale) Hybride in Form eines Hybridfeldes.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- U. Zencker et al.: Embrittlement of spent nuclear fuel claddings during long-term dry interim storage – Current approach at BAM; 2nd IAEA RCM and Consultancy Meeting on Ageing Management Programmes for Spent Fuel Dry Storage Systems; 29.04.-03.05.2019; ANL; Lemont, USA
- U. Zencker et al.: Brittle failure of spent fuel claddings during long-term dry interim storage; 3rd GRS Workshop on Safety of Extended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel; 05.-07.06.2019; GRS gGmbH; Garching, Deutschland
- U. Zencker et al.: Brittle failure of spent fuel claddings under long-term dry interim storage conditions – Preliminary Analysis; International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the past, enabling the future (IAEA SFM 2019); 24.-28.06.2019; IAEA Hauptquartier; Wien, Österreich

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 806.546,89,00 EUR	Projektleiter: Dr.-Ing. Hohe	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Werkstoffversuche: Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Festigkeitswerte des Werkstoffs (GJS-400), zur Quantifizierung des Versagensverhaltens, zur Charakterisierung der Mikrostruktur sowie zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung.
- AP2: Mikrostruktursimulation: Simulation des Versagensverhaltens des Werkstoffs auf der Mikrostrukturebene und des ferritischen Matrixwerkstoffs im spröde-duktilen Übergangsbereich sowie Beschreibung der Interaktion der Rissausbreitung mit den Graphiteinschlüssen.
- AP3: Bruchmechanisches, probabilistisches Versagenskonzept: Herleitung eines kombinierten Versagenskriteriums für duktilen und spröden Versagen.
- AP4: Kontinuumsmechanische Versagensmodellierung: Formulierung des makroskopischen Versagenskriteriums durch kontinuumsmechanische Feldgrößen (Spannung, Dehnung).
- AP5: Ableiten eines probabilistischen Bewertungskonzepts: Statistische Beschreibung aller Eingangsgrößen und Implementierung der Berechnungsschritte und Algorithmen in ein Bewertungsprogramm; Validierung des Bewertungswerkzeugs anhand einer Analyse von Fallbeispielen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Zur Feststellung der Homogenität der Werkstoffparameter wurden Kerbschlagbiegeversuche mit Proben durchgeführt, welche an verschiedenen Stellen des zur Verfügung gestellten Behälters entnommen wurden. Die Zähigkeit der Proben aus der Behälterwand erwies sich dabei als relativ konstant und unabhängig von der lokalen Behälterdicke. Der Boden zeigte indes einen starken Abfall der Kerbschlagarbeit von der Mitte

bis zum Behälterrand. In anschließenden metallographischen Auswertungen konnte ein von der Entnahmeposition relativ unabhängiger Graphitanteil von 13-15 % im Werkstoff festgestellt werden. Auch die Form der Graphitteilchen zeigte keine Abhängigkeiten von der Entnahmeposition. Allerdings erwiesen sich die Graphitteilchen im Boden im Durchschnitt als größer wie die in der Behälterwand. Daneben wurde im Boden höhere Korngrößen des Ferrits gemessen. Ein weiteres Ergebnis war, dass im Behälterwerkstoff teils sehr hohe Anteile an Perlit vorkommen (ca. 20 % im Boden, ca. 5 % in der Wand). Daher muss das Perlit explizit als eigenständiger Gefügeanteil in den weiteren Arbeiten berücksichtigt werden.

- AP2: Die Ergebnisse der Versuche wurden hinsichtlich der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Größe und das Aspektverhältnis der Graphitteilchen ausgewertet. Ferner wurden ein Werkzeug zur Mikrostrukturgenerierung entwickelt und erste FE-Modelle erstellt.
- AP3: In der Literatur wurden weitere Kennwerte für EN-GJS-400-Werkstoffe recherchiert und in eine im Code IWM VERB nutzbare Datenbank integriert.
- AP4: Für die kontinuumsmechanische Versagensmodellierung im Konzept wurde die FKM-Richtlinie „Nichtlinear“ ausgewählt. Bis zur Durchführung eigener Versuche soll angenommen werden, dass die verfügbaren Werkstoffparameter alle wesentlichen Einflüsse (implizit) berücksichtigen und Streuung der resultierenden Versagensgrenzkurven durch die Einbeziehung der Streuung der charakteristischen Dehnungen hinreichend beschrieben wird.
- AP5: Für die bruchmechanischen Kennwerte wurden Streubänder und exemplarisch statistische Verteilungsfunktionen ermittelt, welche zukünftig als Referenz herangezogen werden sollen. Mit der Ableitung bruchmechanischer Ersatzmodelle für die Bewertung für Rissinitiierung und -wachstum am Graphitteilchen wurde begonnen, wobei hierfür ein umlaufender bzw. halbelliptischer Riss an einer kugelförmigen Pore herangezogen wird. Entsprechende FE-Modelle wurden erstellt und mit der Berechnung der Spannungsintensitäten und Variation von Risstiefe und Beanspruchung begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Fortführung der Probenentnahme und -vorbereitung und Beginn der Versuche.
- AP2: Fortführung der Generierung der Mikrostrukturmodelle und Durchführung eines Data Minings auf Basis von Literaturdaten.
- AP3: Erweiterung der Werkstoffdatenbank mit Experimentalergebnissen und Literaturdaten.
- AP4: Ableitung statistischer Verteilungsfunktionen für bruchmechanische Kennwerte sowie einer probabilistischen Beschreibung der Versagensgrenzkurve.
- AP5: Fertigstellung und Implementierung der analytischen Ersatzmodelle.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.093.090,00 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 Langzeit-trockenlagerung sowie Austausch mit den in diese Forschung involvierten Forschungsstellen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Nach Erhalt aktualisierter Eingangsdaten wurden die Rechnungen für den Blind-Benchmark von SKB wiederholt und ausgewertet. Es wurden drei Berechnungsergebnisse eingereicht (zwei mit MOTIVE, eine mit OREST), wobei in den Rechnungen mit MOTIVE zwei unterschiedliche Datenbibliotheken (ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VIII) verwendet wurden.

Im Zuge der Weiterentwicklung des Behältermodells für COBRA-SFS stellte sich heraus, dass die internen Strukturen nicht perfekt mit der Behälterkörperinnenfläche verbunden sind. Die resultierende Lücke besitzt aufgrund des darin befindlichen Füllgases eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit als die Behälterstrukturen. Dadurch entsteht ein thermischer Widerstand, der das Temperaturfeld im Behälter beeinflusst. Vergleichsrechnungen mit und ohne Lücke lassen den Schluss zu, dass Bestimmung und Berücksichtigung solcher Lücken bei Temperaturfeldberechnungen unerlässlich sind. Weiterhin wurde der Einfluss von Schwankungen der Umgebungstemperatur (bspw. durch Jahreszeitenwechsel) auf das Temperaturfeld im Behälter numerisch untersucht. Es zeigte sich, dass sich die Temperaturprofile des Behälterkörpers und der Brennstäbe mit der Umgebungstemperatur verschieben, wobei der Einfluss erwartungsgemäß abnimmt, je zentraler die Position des Brennstabs im Behälter ist.

AP2: Zur Ermittlung einer Methode zur Analyse der mikroskopischen Gestalt von Hydridausscheidungen wurden Berechnungen mit der Software LAMMPS durchgeführt, im Zuge derer geeignete Potentiale zur Beschreibung des Hüllrohrmaterials untersucht und erste Simulationen zum Verhalten der Zr-H-Moleküle durchgeführt wurden.

Die Diffusionsgleichungen für den axialen Wasserstofftransport im Hüllrohr in TESPA-ROD wurden u. a. um eine spannungsabhängige Komponente erweitert. Weiterhin wurde das Diffusionsmodell mit dem Löslichkeitsmodell für Wasserstoff in TESPA-ROD gekoppelt und derart erweitert, dass eine Einteilung der unterschiedlichen Axialzone in unterschiedliche Längen untersucht werden kann.

AP3: Für die Visualisierung der Ergebnisse kommt standardmäßig ParaView zum Einsatz.

AP4: Im Rahmen des fortlaufenden internationalen Austauschs (u.a. auf dem SEDS2019 WS), wurde der Einfluss der o. g. Lücke auf das Temperaturfeld im Behälter bestätigt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Weitere Verbesserungen am COBRA-SFS Modell und Vergleich mit semi-analytischen Rechnungen eines Behältermodells.

AP2: Abschluss der Arbeiten zur mikroskopischen Vorhersage der Gestalt der Hydride, FE-Modellierung des Kriechens bei radial ausgerichteten Hydriden und Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Sprödbruchübergangstemperatur für TESPA-ROD.

AP4: Vorstellung der (bisherigen) Vorhabenergebnisse auf der PATRAM2019.

5. Berichte, Veröffentlichungen

M. Péridis et al.: Temperature fields of loaded spent fuel cask; SEDS2019; 05.-07.06.19; Garching, Deutschland

F. Boldt et al.: Proposal of a benchmark describing the thermo-mechanical behavior during dry storage; SEDS2019; 05.-07.06.19; Garching, Deutschland

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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: Mit der Dokumentation der Rechercheergebnisse wurde begonnen.
- AP2: Die Rechercheergebnisse zur Anpassung des Zielzuverlässigkeitsindex für die Nachrechnung konventioneller und kerntechnischer Bauwerke wurden dokumentiert.

AP3: Die Untersuchungen zu Einwirkungen von außen konzentrierten sich im Berichtszeitraum auf Hochwasser sowie Flugzeugabstürze (FLAB). Bezüglich Hochwassers wurden die Anforderungen im französischen und deutschen Regelwerk recherchiert (ASN Guide N13, KTA 2207). In beiden Regelwerken wird die Auslegung der kerntechnischen Anlage gegen sehr seltene Ereignisse gefordert. Zu den zu berücksichtigenden Ereignissen zählen u.a. Hochwasser aus angrenzenden Gewässern und lokale Starkregenfälle mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 10^{-4} pro Jahr. Die KTA beleuchtet dazu noch Hintergründe ausgewählter Verfahren zur Ermittlung seltener Hochwasserereignisse. Der ASN Guide stellt hingegen die Anforderungen für Überflutungen dar, ohne Verfahren zur Ermittlung seltener Ereignisse vorzuschlagen.

In Bezug auf FLAB wurde eine Bewertungsmethode aus den USA (Dokument NEI-07-13 der NRC) vertieft analysiert, die Betreiber bei der Auslegung ihrer Anlage unterstützen soll. Die Methode gibt Hilfestellung bei der Bewertung kritischer Anlageninfrastruktur sowie bei der Identifikation von Auslegungsmerkmalen und Funktionsfähigkeiten, die zur Einhaltung der Schutzziele beitragen können. Ferner beschreibt das Dokument eine Vorgehensweise zur Betrachtung sowohl eines globalen (bspw. des Flugzeugrumpfs) als auch eines örtlichen Aufpralls (bspw. des Triebwerks).

AP5: Mit der Dokumentation der Rechercheergebnisse zur Monitoring-Verfahren wurde begonnen.

AP6: Die Überlegungen zu erforderlichen Bestandteilen der Methodik wurden fortgeführt. Diese soll u. a. Analysen der Bemessungsanforderungen und der zugrunde liegenden Bemessung, Ergebnisse aus Überprüfungen der Bauwerksicherheit sowie ggf. statistische Nachweise der Tragwerke gegen Einwirkungen von außen beinhalten. In Bezug auf die Ermittlung von Schadenskosten unter Berücksichtigung der menschlichen Sicherheit bei Bauwerksversagen sollen die Ansätze aus dem internationalen Standard ISO 2394-2015 dahingehend analysiert werden, ob diese für die zuverlässigkeitsorientierte Bewertung bestehender kerntechnischer Bauwerke anwendbar sind.

Der Bericht zur im Rahmen des Vorhabens durchgeführten OECD/NEA-Aktivität wurde fertiggestellt und liegt bei der OECD/NEA zur Kommentierung vor.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Abschließende Dokumentation der Rechercheergebnisse zum Stand von W&T.

AP2: Weiterverfolgung der internationalen Normenentwicklung.

AP3: Fortsetzung der Untersuchungen zur Auslegung und probabilistischen Bewertung kerntechnischer Bauwerke gegen Einwirkungen von außen.

AP5: Abschluss der Arbeiten zur Berücksichtigung von Monitoring-Maßnahmen.

AP6: Fortführung der Entwicklungsarbeiten an der Methodik zur Ermittlung der vorhandenen Zuverlässigkeit bestehender kerntechnischer Bauwerke.

AP7: Definition von Bestandteilen 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
Gesamtkosten des Vorhabens: 520.315,00 EUR	Projektleiter: Dr.-Ing. Bahr

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Als vereinfachtes Verfahren zu Alterungsmechanismen wurde das Gleichungssystem zur Berechnung der Dehnung in Folge des Kriechens und Schwindens einer Betonstruktur in der Software MATLAB implementiert, welches im FIB Model Code 2010 enthalten ist. Alle Daten der Dehnungsmessungen zum Kriech- und Schwindverhalten am VeRCoRs-Modellcontainment, die im Rahmen des VeRCoRs-Benchmarks zur Verfügung gestellt wurden, wurden mit dem Gleichungssystem nachgerechnet. Die Berechnungen der Kriech- und Schwinddehnungen stimmen gut mit den gemessenen Werten überein. Es bestehen jedoch noch Berechnungsunsicherheiten bei der Beschreibung der Spannkabel-Spannung.
- AP2: Das Theory Manual des von EDF mitentwickelten Finite-Elemente-Programms Code_Aster wurde hinsichtlich der strukturmechanischen Simulation von Betonstrukturen unter Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden ausgewertet. Neben dem hohen Implementierungsaufwand und der Komplexität des Programmes Code_Aster verhindert die problematische implizite Simulation einen Einsatz zur strukturmechanischen Simulation bis zum Strukturversagen. Die Konvergenzprobleme der impliziten Simulation, die schließlich zum Abbruch der Simulation führen, wurden in vergleichbaren Fragestellungen hinlänglich belegt. Als zielführend für die strukturmechanische Simulation bis zum Strukturversagen wird die explizite Simulation mit dem eingesetzten Programm LS-DYNA angesehen. Hier können allerdings die zur Verfügung stehenden Beton-Materialmodelle nicht mit Routinen zum Kriech- und Schwindverhalten kombiniert werden. Der Einsatz eines viskoelastischen Materialmodells für quasi-elastische strukturmechanische Simulation wird als die beste Möglichkeit angesehen.
- AP3: Neben der Dehnung an verschiedenen Stellen im VeRCoRs-Modellcontainment wurden auch klimatische Einflussgrößen des Kriechens und Schwindens, wie Temperatur und Luftfeuchte, an verschiedenen Stellen gemessen. Für die Berechnung der Kriech- und Schwinddehnungen wurden vereinfachte Temperatur- und Luftfeuchteverläufe aus den zur Verfügung gestellten Daten aus dem VeRCoRs-Benchmark generiert, die repräsentativ für verschiedene Bereiche des Modellcontainments sind. Die Berechnungsergebnisse der vereinfachten Verfahren zu Kriech- und Schwinddehnungen wurden für den Vergleich mit Finite-Elemente-Simulationen vorbereitet.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Zur Verbesserung der Berechnung der Kriech- und Schwinddehnungen, soll die Einwirkung der Spannkabel-Spannung auf die Dehnungen in der Betonstruktur weiter untersucht werden.
- AP2: Der Einsatz eines viskoelastischen Materialmodells in der Finite-Elemente-Simulation mit LS-DYNA zur Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden in Beton soll fortgeführt werden. Zu der spezifischen Umsetzung soll die Fachliteratur weiter ausgewertet werden.
- AP3: Die Ergebnisse der strukturmechanischen Simulation sollen mit den im Rahmen des VeRCoRs-Projekts gemessenen Dehnungen an den Messstellen in der Betonstruktur, die den Teilnehmern des VeRCoRs-Benchmarks zugänglich gemacht wurden, 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 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 3.057.537,00 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 Beschreibung des Materialverhaltens für die rechnerische Nachweisführung. Untersuchungsschwerpunkte sind Füllsäulen aus verdichtetem Steinsalz, Widerlagerelemente aus MgO-Beton, Weiterentwicklung der Bauausführung und Qualitätskontrolle von Asphalt dichtungen, Zusatzuntersuchungen zum Bentonitdichtelement (z. B. Integration von Äquipotentialsegmenten), Analyse von Bauzuständen sowie Belastungs- und Strömungsprozessen in FE- und PFC-Modellen. Das Vorhaben ELSA2 kann in den Schwerpunkt 3 der Technologie-Plattform (IGD-TP): "Plugging and Sealing" eingeordnet werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Arbeiten abgeschlossen.

AP2: Planungsarbeiten abgeschlossen. Teilbericht fertig gestellt.

AP3: Im Jahr 2017 wurde in der Grube Teutschenthal im Steinsalz ein 3,2 m langer Pfropfen mit einem Durchmesser von 1,3 m aus MgO-Beton der Rezeptur C3 (3-1-8-Bindemittelphase) fertiggestellt („Großbohrlochversuch“). Die Phasenentwicklung wird an Proben im Labor im Klimaschrank nachvollzogen, wobei im Klimaschrank der gleiche Temperaturverlauf nachgefahren wird, der im Großbohrlochversuch gemessen wurde. Der Phasenbestand der mit dem Temperatur-Zeit-Fenster 70 °C (typisch für Kern) und 40 °C (typisch für Randbereich zur Steinsalzkontur) entwickelt sich wie folgt: Bei der Abbinde­temperatur 70 °C und nachfolgender Abkühlung ist nach 14 Tagen die 3-1-8-Bindemittelphase schon nachweisbar. Die primär gebildete 5-1-8-Bindemittelphase ist auch nach 42 Tagen noch vorhanden. Bei der Abbinde­temperatur 40 °C und nachfolgender Abkühlung ist nach 9 Tagen die 3-1-8-Bindemittelphase deutlich nachweisbar. Die primär gebildete 5-1-8-Bindemittelphase ist auch nach 77 Tagen noch vorhanden. Da die Phasenumwandlung noch nicht abgeschlossen ist, steigen die Expansionsdrücke noch an.

AP4: Im ersten pneumatischen Vortest (IBeWa) wurde eine effektive Gaspermeabilität des Gesamtsystems „Pfropfen im Großbohrloch“ mit dem MgO-Beton C3 im Steinsalz zwischen $3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ und $3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ermittelt. Damit kann das Gesamtbauwerk als technisch dicht angesehen werden. Der Kontaktdruck zwischen Steinsalz und MgO-Beton C3 beträgt 180 Tage nach der Betonage ca. 4,5 MPa und steigt weiter an. Dieser hohe Kontaktdruck ist mit großer Wahrscheinlichkeit durch den Expansionsdruck des MgO-Betons C3 verursacht. In radialer Richtung betragen die Dehnungen 0,5 mm/m. Zur Verifizierung des umliegenden Gebirgsdruckes ist am Versuchsort eine Hydrofracmessung des IfG vorgesehen. In axialer Richtung kann sich der Pfropfen verformen, die axiale Dehnung liegt hier zwischen 1 mm/m und 7,5 mm/m und liegt im Einklang mit den Messwerten der Extensometer an der Luftseite des Pfropfens. In axialer Richtung liegt der Expansionsdruck bei ca. 1,7 MPa.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Fortschreibung der Teilberichte.

AP2: Keine weiteren Arbeiten.

AP3: Fortsetzung der Untersuchungen an Proben des MgO-Betons C3, die nach dem tatsächlichen Temperatur-Zeit-Verlauf des Großbohrlochversuches hergestellt wurden (Phasenbestand, Festigkeiten, Permeabilität).

AP4: Fortsetzung der Auswertung der Messwerte am Großbohrlochversuch zum Test eines Verschlusselementes aus MgO-Beton C3 im Steinsalz. Bestimmung der lokalen Permeabilität in der Druckbeaufschlagungsbohrung und zweiter pneumatischer Vortest des Systems. Vorbereitungen zur Lösungsdruckbeaufschlagung.

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 31.08.2020	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

AP5: Im Berichtszeitraum wurde an der Verknüpfung zwischen dem partikelbasierten Code PFC3D und einer kontinuumsmechanischen Umgebung (FLAC3D) sowie der dynamischen Anregung des Modells durch ein Erdbeben weitergearbeitet. Als Testmodell dient eine 50 m

hohe Schottersäule. Die Korngröße des Schotters wurde im Modell um den Faktor 6 vergrößert (zur Verringerung der Rechenzeit). Die Beobachtungspunkte zeigen innerhalb der Schottersäule einen Verlauf der Vertikal- und Horizontalspannungen, wie er im Rahmen der Silotheorie zu erwarten ist. Nach anfänglichem Anstieg der Spannungen stellt sich ab einer Füllhöhe von ca. 10 m eine konstante Spannung ein. Das Modell wurde mit dem Referenzerdbeben belastet (P und S-Wellen zusammen). Die Beschleunigung und die Bewegung der Partikel in der Säule entsprechen dem Erdbebenimpuls. Die Bewegungsabläufe weichen im oberen Teil stärker vom Erdbeben ab als im unteren. Dies begründet sich durch die Neuorientierung der Partikel. In der Schottersäule stellt sich ein verändertes Lastverhältnis ein. Die Horizontalspannung steigt, die Vertikalspannung sinkt. Die beobachteten Setzungen sind sehr gering und betragen gerade einmal 1 cm.

Zur weiteren Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse wurde ein zweites Erdbeben an der bereits dynamisch angeregten Säule simuliert. Es traten dabei keine weiteren Setzungen auf. Die Spannungsverläufe bleiben quasi unverändert. Die Säule scheint somit bereits nach dem ersten Erdbeben eine Art dichteste Lagerung erreicht zu haben.

Am Modell (Kopplung Kontinuum-Partikel und dynamische Anregung) wurden im Weiteren Parameterstudien zum Dämpfungsverhalten der Partikel, des Reibungswinkels und der Partikelverteilung begonnen. Dämpfung und Reibung werden immer an der bestehenden Partikelsäule geändert und zunächst bis zum Gleichgewicht gerechnet. Dann wird das Erdbeben aufgebracht. Von der Generierung einer neuen Schottersäule für jeden Parametersatz wird auf Grund der langen Rechenzeiten abgesehen. Der Dämpfungsbeiwert wurde in einem Bereich von 0,01 bis 0,9 (0,5=kalibrierter Wert) variiert. Die Änderung des Dämpfungswertes zeigte keine Änderungen im Spannungsverlauf und Setzungsverhalten. Der Reibungswinkel wurde deutlich herabgesenkt und deutlich erhöht. Die Berechnungen sind noch nicht abgeschlossen. Zwischenergebnisse zeigen, dass sich neue Spannungsverläufe einstellen, die ebenso mit der Silotheorie vereinbar sind.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP5: Die Arbeiten zur Simulation von Schottersäulen mit Hilfe eines partikelbasierten Codes werden weitergeführt. Die Parameterstudien zur Dämpfung, Reibung und der Partikelverteilung sollen abgeschlossen werden. Als Gebirge wurde bisher Steinsalz angenommen; entsprechende Parameter für Tongestein müssen noch im Modell umgesetzt werden.

AP6: In Abstimmung mit TU Freiberg wurde eine Anpassung der Berichtsstruktur vereinbart. Für bereits abgeschlossene APs sollen die Teil- und Abschlussberichte erstellt werden bzw. die vorhandenen Berichtsentwürfe finalisiert werden.

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 30.09.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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 Ent sättigung 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

Während des Berichtszeitraums stand das Feuchtemessgerät VSA nur kurze Zeit zur Verfügung. Überprüft werden konnte in der verbleibenden Zeit die Funktionstüchtigkeit der Klimakammer der VSA für den Fall, dass eine Mikrozelle einen nennenswerten Anteil des Volumens einnimmt. Bei Einsetzen eines Kunststoffdummies ließ sich die Luftfeuchtigkeit einwandfrei einstellen.

Es wurde weiterhin versucht, die Messungen zur Temperaturabhängigkeit der Isothermen zu beschleunigen, indem nicht ganze Isothermen aufgenommen, sondern die Temperatur bei festgelegten Feuchtigkeitsstufen variiert werden. Es zeigte sich, dass die zu messenden relativ geringen Änderungen des Wassergehalts mit der Genauigkeit, die das standardmäßig eingestellte Abbruchkriterium für eine statische Messung erlaubt, nicht ausreicht.

Für die bereits ermittelten Adsorptions-Scanlines für MX-80 bei 25 °C wurden analytische Funktionen entwickelt. Dabei wurde auf eine einfache Implementierbarkeit der Funktionen geachtet. Der Ansatz besteht im Wesentlichen darin, die anfängliche Differenz zwischen Desorptions- und Adsorptionsisotherme mit ansteigender relativer Luftfeuchtigkeit zu verringern.

Für die Desorptions-Scanlines war dies überraschenderweise nicht so einfach möglich, obwohl der gemessene Verlauf dies erwarten lies. Eine befriedigende Formulierung wurde noch nicht gefunden. Möglicherweise müssen desorptionsspezifische Effekte berücksichtigt werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Fortsetzung der Messungen mit der VSA zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Isothermen
- Bestimmung der Isothermen und Scanlines für Calcigel
- Herleitung geeigneter analytischer Funktionen zu deren Beschreibung
- Modellierung einer generischen Aufsättigungssituation mit MX-80 zur Untersuchung des Einflusses der neuen Isothermenfunktionen
- Herstellung der Zellen zur systematischen Quantifizierung des Einflusses einer Einspannung der Bentonitproben auf die Mikrostruktur des Bentonits. Abweichend vom ursprünglichen Plan, die Zellen aus Titan zu fertigen, ist nunmehr die Beschaffung eines 3D-Druckers für diesen Zweck beantragt

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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 Streckenlagerexperiment der NAGRA im 1:1 Maßstab
- AP2: HE-E Experiment – Weiterführung des im Rahmen des EU-Projekts PEBS aufgebauten Erhitzerversuchs im Mikrotunnel (mit NAGRA, ENRESA und BGR)
- AP3: DM-A Experiment – Langzeitverformungsmessung des Tonsteins in einem Bohrloch
- AP4: SB-A Experiment – Untersuchung von Bohrlochabdichtung und Auflockerungszone (mit BGR)
- AP5: DB Experiment – Messung von Porendruckverlauf sowie chemischem und thermischem Potential im ungestörten Tonstein in einem tiefen Bohrloch durch die Opalinuston-Formation (mit Swisstopo, IRSN, NWMO, NAGRA und BGR)
- AP6: LT-A Experiment – Eigenschaften der sandigen Fazies: Modellkalibrierung an Hand von Laborexperimenten (mit BGR)
- AP7: Weiterentwicklung von VIRTUS für den Einsatz in Tonstein
- AP8: Mine-By Experiment (MB-A) in der sandigen Fazies (mit BGR und Swisstopo)
- AP9: Technical und Steering Meetings

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Messungen des Porendrucks in der Umgebung des FE-Tunnels dauern an und liefern aussagekräftige Ergebnisse.
- 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 Dilatometer-sonde die Langzeitverformung des Bohrlochquerschnitts sowie ergänzend Temperatur und Luftfeuchte gemessen. Die bisher gemessene stetige, nahezu stationäre Bohrlochkonvergenz hat sich seit März 2018 mit der Auffahrung der Nischen 7 und 8 der Gallery 18 vorübergehend beschleunigt.
- AP4 und AP5 sind seit längerem abgeschlossen.
- AP6: Die im Rahmen des LT-A-Programmes geplanten Laboruntersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der sandigen Fazies des Opalinustons sind erfolgreich durchgeführt worden. Die gewonnenen Ergebnisse sind ausgewertet und werden im Abschlussbericht zusammengefasst.
- AP7: Keine größeren Arbeiten.
- AP8: Im Februar 2019 wurde die Nachinstrumentierung der Minipiezometer erfolgreich durchgeführt. Nach der Erreichung eines Druckgleichgewichts in den Bohrungen wurden Wasserinjektionstests zur Permeabilitätsbestimmung durchgeführt. Der eigentliche Mine-By-Test erfolgte im Mai 2019 bei der weiteren Auffahrung der Gallery 18 und dem Durchstich zu den vorher aufgefahrenen Nischen 7 und 8. Dabei stieg der an zwei Piezometern gemessene ursprüngliche Porendruck von 1.5 – 1.6 MPa wegen der elastischen Gebirgsreaktion zunächst deutlich an (Maximalwerte bis 3.7 MPa), um dann auf Grund von Schädigung und Drainage des Gebirges im Nahbereich der Auffahrung auf atmosphärische Werte zu sinken. Im weiter entfernten Bereich war die elastische Reaktion abgeschwächt ebenfalls zu beobachten, nach Ende der Auffahrung stellte sich jedoch wieder der ursprüngliche Porendruck ein. Eine detailliertere Auswertung mit entsprechender Modellierung ist für das Folgeprojekt geplant.
- AP9: Teilnahme am Technical Meeting im Februar 2019, am Steering Meeting im März 2019 sowie an einer Veranstaltung zur Vollendung der Erweiterung des Felslabors im Mai 2019.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Abschlussbericht
- Fortführung der laufenden Experimente im Folgeprojekt MonTe25

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 30.11.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

Ein Langzeitexperiment zur Bestimmung der Löslichkeitskonstante von $\text{Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ (Fe-Hibbingit zeigte nach 40 Monaten gegenüber der Messung nach 5 Monaten keine Änderung mehr. Dieselbe Probe wurde nun auch bei 40 °C untersucht. Bei dieser Temperatur wird eine geringfügig kleinere Löslichkeitskonstante berechnet. Ein Langzeitversuch mit Chukanovit brachte ebenfalls keine Änderung der Löslichkeitskonstante bei 25 °C. Es zeigt sich aber, dass für die Auswertung der Messungen an Chukanovit bei 40 °C (und auch höheren Temperaturen) nur unzureichend Informationen über die unter schwach basischen Bedingungen vorherrschenden Fe(II)-Komplexe vorliegen.

In einem weiteren Experiment wurde die Stabilität von Amakinit – $(\text{Fe.Mg})(\text{OH})_2$ bei 25 °C bestimmt. Es zeigte sich, dass bei Mg-Gehalten bis 80 Mol-% eine feste Lösung existiert, die annähernd ideal ist. Eine feste Lösung wurde auch zwischen Chukanovit – $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ und wasserfreiem Pokrovskit – $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ nachgewiesen.

Auf Basis der bisher gesammelten Erkenntnisse wurden Abschätzungen zur Entwicklung des pH-Wertes und des Redox-Niveaus, bzw. des Wasserstoff-Partialdrucks im Nahfeld eines Endlagers im Unterkreideton durchgeführt. Für diese Rechnungen wurden zunächst zwei Faktoren als ungewiss angenommen: die Möglichkeit der Reduktion von Sulfat und die Bildung von Magnetit im Korrosionsprozess. Für beide Prozesse ist nicht abschließend geklärt, ob sie bei erhöhten Temperaturen in relevantem Ausmaß auftreten. Je nach Wahl der Faktoren ist werden pH-Werte zwischen 9,7 und 10,5 sowie H_2 -Drücke um 10^{-4} bis zu einigen Hundert bar erhalten. Die größte Spannweite verursacht bereits die Zulassung von Magnetit. Dieses wird regelmäßig in der Literatur als stabilste Korrosionsphase ausgewiesen, bei Experimenten tritt es aber häufig nur in untergeordneter Menge auf. Hier besteht also noch dringender Bedarf, die Art der Korrosionsphasen unter realitätsnahen Bedingungen zu bestimmen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Abschluss von Löslichkeitsmessungen an Fe-Korrosionsphasen bei erhöhten Temperaturen. Abschätzung der Auswirkung des erwarteten Redoxniveaus auf die Löslichkeit ausgewählter Radionuklide und Modellierung der Ausbreitung im Endlagergebäude.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Hagemann, S. (2019): Iron corrosion under anaerobic, saline conditions - corrosion products and their impact on pH and redox potential (Präsentation). 6th International Workshop on Actinide Brine Chemistry in a Salt-Based Repository - ABC-Salt (VI) - Karlsruhe, Germany, 25th - 26th June, 2019

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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:

- Fertigstellung der Publikation zum Einfluss von Sulfat auf die U(IV)-Speziation. Thermodynamische Parameter und strukturelle Eigenschaften der U(IV)-Sulfat Spezies in Lösung wurden abgeleitet.
- Strukturaufklärung der U(IV)-Sulfatspezies in Lösung mittels Infrarotspektroskopie und quantenchemischer Berechnungen des U(IV)-Sulfat-System und des Vergleichssystems Th(IV)-Sulfat.
- Durchführung von U(IV)-Chlorid-Speziationsuntersuchungen in pH-Wertbereich von 0 bis 2 mit deuterierten Lösungen zur Identifizierung des Einflusses von Cl⁻.
- Untersuchung des Einflusses von Tieftemperatur auf die Fluoreszenzeigenschaften des freien Uran(IV) und des Uran(IV)-Chlorid Systems in Kombination mit UV/Vis Messungen.
- Wellenlängenabhängige TRLFS für U(IV)-Speziationsuntersuchungen am Sulfat-System bei Tieftemperatur, Abhängigkeit der Lebenszeit von der Temperatur und Einfluss der Anregungswellenlänge auf das Lumineszenzverhalten.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3.2:

- Einreichung der Publikation zum Einfluss von Sulfat auf die U(IV)-Speziation: „Thermodynamic and structural aspects of the aqueous uranium(IV) system – hydrolysis vs. sulfate complexation“.
- Abschluss der Löslichkeits-Untersuchungen von Uran(IV) und spektroskopischen Bestimmung der Uran(IV, VI) Speziation in endlagerrelevanten Gruben- und Porenwässern.
- Erstellung des Projekt-Abschlussberichtes.

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.: Spectroscopic insights into U(IV) speciation in aqueous solution. Poster-Präsentation auf der EGU General Assembly 2019, 07.-12.04.2019, Wien, Österreich

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: 01.01.2019 bis 28.02.2019
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 Gipschlösung 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 re-
agierten Proben in der letzten Messkampagne fortgeführt.

Die im Projekt enthaltenen Ergebnisse werden im Abschlussbericht zusammengefasst.

4. Geplante Weiterarbeiten

Keine. Projekt beendet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.01.2019 bis 31.03.2019	
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:

- AP1: Charakterisierung von Referenzmineralen
- AP2: Eisensubstitutionen in Smektiten
- AP3: Eisensubstitutionen an Smektitoberflächen
- AP4: 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

AP2, V2: Fe(III)-Substitutionen in Smektiten

In der Verlängerungsphase des Projektes wurden vor allem ergänzende Dichtefunktionalmodellierungen fertiggestellt, die sich mit dem Einfluss von Zwischenschichtwasser in Smektiten auf die Verteilung oktaedrischer Eisensubstitutionen befassen. Diese exemplarischen Modellierungen dienen dazu, bisherige systematische Ergebnisse, die hauptsächlich an wasserfreien Mineralmodellen gewonnen wurden, kritisch zu beleuchten und zu überprüfen. Für ein transvakantes Beidellitmodell der Schichtladung $-0.25 e$ ergaben sich Variationen der relativen Energien der Fe(III)-Substitutionen an verschiedenen Gitterplätzen von bis zu 3 kJ/mol, wenn Na^+ -Zwischenschichtionen mit drei Wassermolekülen solvatisiert werden. Bevorzugte und ungünstigste Plätze der Eisensubstitution sind mit und ohne solvatisierte Zwischenschichtionen gleich. Für ein beidellitische transvakantes Smektitmodell der Schichtladung $-0.5 e$ wurden nur leichte Variationen der relativen Energien für Fe(III) an verschiedenen Gitterplätzen von bis zu 2 kJ/mol gefunden. Trotz insgesamt geringer Energieunterschiede bleiben auch in diesem Fall Gruppen von bevorzugten und ungünstigen Plätzen erhalten. Für das beidellitische Smektitmodell der Schichtladung $-0.5 e$ wurde auch eine Variation der Anordnung der Na^+ -Ionen in der Zwischenschicht betrachtet. Für zwei verschiedene Anordnungen der Zwischenschichtionen variieren die relativen Energien der Fe(III)-Substitution um 3 bzw. 7 kJ/mol, wobei die Energieunterschiede zwischen verschiedenen Plätzen qualitativ meist gleich sind. Dies zeigt, dass die Anordnung der Zwischenschichtionen einen größeren Einfluss auf die Verteilung von Fe(III)-Substitutionen hat als die Solvatisierung dieser Ionen, was zur Verbesserung zukünftiger Modellierungen verwendet werden kann. Absolute Austauschenergien oktaedrischer Al^{3+} -Ionen gegen Fe^{3+} hängen hingegen ähnlich stark von der Lage als auch der Solvatisierung der Zwischenschichtionen ab. Sie variieren jeweils um bis zu 3 bzw. 5 kJ/mol.

Die Interpretation der Energieunterschiede von Fe(III)-Substitution in Smektiten, die in vielen Fällen mit dem Volumen des Platzes korrelieren, konnte verbessert werden. Die Berücksichtigung der beiden Typen von Substitutionsplätzen in cis-vakanten Gittern sowie des Einflusses oktaedrischer Mg-Substitutionen verbessert die Korrelation mit dem Volumen, was sich mit unterschiedlichen Relaxationsenergien der Gitterplätze erklären lässt. Die fehlende Volumenkorrelation der Fe(III)-Substitutionsenergien transvakanter, hochgeladener Montmorillonite ist damit weitgehend verstanden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Erstellung des Abschlussberichts.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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 31.11.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 935.201,00 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

Die Löslichkeit von Radionukliden in Salzlösungen bei verschiedenen pH-Werten wurde im Berichtszeitraum weiter untersucht. Im Mittelpunkt stand die Auswertung von Versuchen in in NaCl-, IP9- und synthetischer Unterkreidetonwässern. Hierzu wurden umfangreiche Analysen von Lösungsproben durchgeführt. Sie werden dazu dienen Löslichkeitsgrenzen für die untersuchten Elemente im pH-Bereich 6 bis etwa 11 in den drei genannten Lösungstypen abzuleiten.

Nach bisherigen Ergebnissen sind die Löslichkeiten der Elemente Sm, Mo(VI), Sr, Nb, Sn(IV), Se(IV) und Zr in NaCl-Lösungen nur wenig vom pH-Wert abhängig. Die Löslichkeit von Pb und Ni nimmt mit zunehmendem pH-Wert in allen drei Lösungstypen stark ab. Bei einigen Elementen wird die Bestimmungsgrenze des verwendeten ICP-MS bei einigen oder allen Proben unterschritten. Die betrifft insbesondere Ni, Nb und Sn.

Zugleich wurden noch ausstehende Löslichkeitsversuche in IP21-Lösung unter aeroben Bedingungen angesetzt. Mit einer Analyse ist im zweiten Halbjahr zu rechnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Fortsetzung der Versuche zur Bestimmung der Löslichkeit von Spaltelementen in ausgewählten salinaren Lösungen (IP21/ aerob und anaerob, halitgesättigte Lösung/ anaerob).
- Des Weiteren werden für ausgewählte Systeme integrale Langzeitversuche angesetzt, bei denen die Spaltelementkorrosion während fortlaufender Eisenkorrosion und unter Wasserstoffdruck bestimmt wird.
- Ableitung von Löslichkeitsgrenzen in den Lösungen IP9, Unterkreide und halitgesättigte Lösung.
- Überprüfung der Auswirkung neuer oder aktualisierter Löslichkeitsgrenzen auf die Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen.

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 31.10.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 Handlungsoptionen bei Erreichen von „Trigger Values“ 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
- AP4: Handlungsoptionen bei Erreichen von „Trigger Values“ und offene Fragen
- AP5: Dokumentation der Ergebnisse

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Vom 09. bis 11. April dieses Jahres fand in Paris die Abschlusskonferenz des europäischen Verbundprojektes MODERN2020 statt. Die Ergebnisse des Projektes wurden auf dieser Konferenz vorgestellt und diskutiert. Dies betraf sowohl die Strategie zur Entwicklung eines Monitoring-Programms als auch die beispielhafte Umsetzung dieser Strategie für ein Endlager in Ton- oder Salzformationen in Deutschland.

Neben der Finalisierung der Monitoring-Konzepte für Endlager im Ton- und Salzgestein nahm deren Beschreibung im Rahmen des Abschlussberichtes einen großen Teil der durchgeführten Arbeiten im Berichtszeitraum ein.

Der Abschlussbericht schildert zunächst, wie sich das Thema Monitoring im internationalen Kontext entwickelt hat und gibt einen Überblick über die historische Entwicklung internationaler und nationaler Projekte zum Thema Monitoring in den letzten 20 Jahren. Es werden die Rahmenbedingungen für ein Monitoring in Deutschland erläutert und die damit verbundenen regulatorischen Anforderungen und Richtlinien. Darauf bezogen wird ein Weg aufgezeigt, wie ein sinnvolles Monitoring Programm entwickelt werden kann, insbesondere im Zusammenhang mit aktuellen Sicherheits- und Nachweiskonzepten, wie sie im Rahmen von FuE-Projekten in den letzten Jahren in Deutschland entwickelt wurden. Mit Blick auf die Möglichkeiten und Grenzen eines Monitoring wird abschließend diskutiert, in welcher Form die Ergebnisse eines Monitoring genutzt werden können, um sowohl wesentliche Entscheidungen im Verlauf des Einlagerungsprozesses informativ zu unterstützen, als auch zur Vertrauensbildung beizutragen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Finale Beschreibung der entwickelten Monitoring-Konzepte und der zugehörigen Entscheidungsprozesse innerhalb des Abschlussberichtes unter Berücksichtigung der in dem Projekt MODERN2020 entwickelten Konzeptionsvorschlägen.
- Auswertung der Diskussionsergebnisse aus der Abschlusskonferenz des MODERN2020 Projektes und Integration in die Themenbereiche des Abschlussberichtes. Zu diesem Zweck werden die schriftlichen Dokumentationen der drei Rapporture der Konferenz durchgesehen und die wesentlichen Ergebnisse in den deutschsprachigen Abschlussbericht implementiert.
- Prüfung und Finalisierung des Abschlussberichtes.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

In Sorptionsexperimenten wurde die Rückhaltung von U(VI) (1×10^{-7} M bzw. 1×10^{-6} M) und Np(VI) (4×10^{-9} M bzw. 1×10^{-8} M) an Calcium-Silikat-Hydrat (C-S-H)-Phasen mit verschiedenen Ca:Si (C:S)-Verhältnissen in MilliQ-Wasser sowie an Zementsteinpulver (HCP) mit einem Wasser/Zement-Verhältnis von 0,5 in verdünnter Gipschlösung (VGL) von pH 8 – 13 untersucht. Hierbei zeigte sich eine Abhängigkeit der Sorption von der Herstellungsmethode der C-S-H-Phasen. Wurden die Edukte direkt eingewogen (S/L = 1 g/L), konnte eine Abnahme der Vertei-

lungskoeffizienten R_d mit steigendem C:S-Verhältnis (0,7 – 1,8) für U(VI) ($3 \times 10^6 - 8 \times 10^4$ L/kg) und für Np(VI) ($1 \times 10^5 - 3 \times 10^4$ L/kg) beobachtet werden. Wurden die C-S-H-Phasen zunächst mit einem S/L-Verhältnis von 15 g/L hergestellt und anschließend auf 1 g/L verdünnt, war R_d für U(VI) unabhängig vom C:S-Verhältnis ($R_d \approx 4 \times 10^5$ L/kg). Für die Sorption an HCP wurde bei hohen pH-Werten (11,5 – 13,0) eine Abnahme von R_d sowohl für U(VI) ($8 \times 10^5 - 3 \times 10^3$ L/kg) als auch für Np(VI) ($5 \times 10^6 - 5 \times 10^4$ L/kg) beobachtet.

Der Einfluss von Gluconat (GLU; 0,01 M Na-Gluconat) auf die Sorption von 1×10^{-6} M U(VI) bzw. Np(V) an HCP in synthetischem Zementporenwasser (ACW; pH 13,2) und C-S-H-Phasen (C:S 0,75; MilliQ; pH 10,6) sowie von 2×10^{-8} M Am(III) an HCP (ACW-VGL; pH 12,2; S/L = 2,5 g/L; Ar-Atmosphäre) wurden untersucht. Dabei wurde die Reihenfolge der Zugabe von Actinid und GLU variiert. Bei den Batchexperimenten mit C-S-H-Phasen hatte die Anwesenheit von GLU keinen Einfluss auf die Sorption von U(VI) und Np(V). Im Falle von HCP gab es eine Beeinflussung der Sorption von U(VI), Np(V) bzw. Am(III) durch die Zugabe von GLU, die noch weiter untersucht werden muss.

Die Diffusionsversuche mit 8×10^{-6} M $^{99}\text{TcO}_4^-$ in Ca-Bentonit (Ca-B) bei 21 °C und 60 °C in VGL bei pH 7,2 – 7,5 an Luft wurden abgeschlossen. Die mittels HTO-Diffusion bestimmten Porositäten des Ca-B betragen 0,40 – 0,45. Die ermittelten Diffusionsparameter für Tc in Ca-B liegen bei $D_e = 1,2 \times 10^{-11}$ m²/s und $\alpha \approx 0,21$ bei 21 °C. Für die Diffusion bei 60 °C in Ca-B wurden für Tc $D_e = 2,5 \times 10^{-11}$ m²/s und $\alpha = 0,15 - 0,21$ erhalten.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Abschluss der Batch-Versuche zur Sorption von Actiniden an C-S-H-Phasen in VGL
- Wiederholung einiger Batchexperimente zum Einfluss von GLU auf die Actinidensorption 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
- Experimente zur Diffusion von Np, Pu und Tc in HCP (filterfreie Diffusionszelle)

5. Berichte, Veröffentlichungen

R. Scholze, S. Amayri, T. Reich: Modeling the sorption of Np(V) on Na-montmorillonite – effects of pH, ionic strength and CO₂, *Radiochim. Acta*, 107(7), 615-622 (2019)

V. Häußler, S. Amayri, A. Beck, T. Platte, D. Prieur, A. Roßberg, T.A. Stern, T. Vitova, T. Reich: Investigation of the uptake of Th, U, Np, Pu and Am by calcium-silicate-hydrate phases, Vortrag auf dem 5th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions (CEM2019), 25.-27.03.2019, Karlsruhe, Deutschland

S. Amayri, A. Beck, T. Platte, D. Prieur, A. Roßberg, T.A. Stern, T. Vitova, T. Reich: Sorption and speciation of Pu on hardened cement paste (HCP), Poster auf dem 5th International Workshop on Mechanisms and Modelling of Waste /Cement Interactions (CEM2019), 25.-27.03.2019, Karlsruhe, Deutschland

J. Schäfer: Der Einfluss von Gluconat auf die Sorption von Neptunium(V) an C-S-H-Phasen und Zement, 2019, 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

Nach der Charakterisierung der synthetisierten U(VI)/C-A-S-H-Phasen mittels PXRD, IR, $^{27}\text{Al}/^{29}\text{Si}$ -NMR, TGA, DSC und TRLFS wurde die Stabilität dieser Phasen in verschiedenen Salzlösungen (2,5 M NaCl bzw. 2,5 M NaCl/0,02 M NaHCO₃) mittels Leachingexperimenten ermittelt. In carbonatfreier NaCl-Lösung wurde kein Einfluss des Aluminiums auf die Uranfreisetzung beobachtet. Mittels TRLFS-Spektroskopie wurde gezeigt, dass das Uran auf der Oberfläche und in den Zwischenschichten von Al-Tobermorit und Al/C-S-H Phasen gebunden ist. In Gegenwart von Carbonat (2,5 M NaCl/0,02 M NaHCO₃) wurde eine Verdoppelung der Uranfreisetzung in Proben mit hohen Aluminium-Gehalten beobachtet.

Der Einfluss von Calcium auf die Sorption von U(VI) an Tonmineralen bei (hyper)alkalinen Bedingungen wurde systematisch untersucht. Dazu wurden unter CO₂-Ausschluss Batch-Sorptionsversuche mit Ca-Bentonit, Na-Montmorillonit, Muskovit und Kaolinit durchgeführt, aus denen unterschiedliche Mengen Calcium freigesetzt werden. Als Hintergrundelektrolyt wurden 0.1 M NaCl bzw. 0.1 M NaCl + 0.02 M CaCl₂ verwendet. Bei den Versuchen mit Ca-Bentonit und Na-Montmorillonit, die beide signifikante Mengen an Calcium enthielten, wurde eine extrem hohe U(VI)-Sorption bis pH 12 beobachtet. Die nahezu Calcium-freien Minerale Muskovit und Kaolinit zeigten einen starken Rückgang der U(VI)-Sorption bei pH > 10. Eine Zugabe von Calcium führte wiederum zu einer starken Erhöhung der U(VI)-Sorption an Muskovit und Kaolinit im pH-Bereich 10-13. [^{45}Ca]Ca(II)-Sorptionsversuche an Ca-Bentonit bestätigten eine starke Sorption von Ca²⁺ im pH-Bereich 8-13.

In Kooperation mit dem Institut für Kernchemie der Johannes Gutenberg-Universität Mainz wurden komplementäre Versuche zur Np(VI)-Sorption an Muskovit durchgeführt. Ähnlich wie bei U(VI) ist auch hier eine starke Erhöhung der Sorption in Anwesenheit von Calcium im pH-Bereich 9-12 zu beobachten.

Zur Aufklärung der Struktur der U(VI)-Komplexe auf der Muskovitoberfläche bei pH 11 wurden Versuche zur Oberflächenröntgenbeugung (CTR und RAXR) an der Advanced Photon Source (APS, Argonne, USA) durchgeführt. Vorläufige Ergebnisse bestätigen den großen Einfluss von Calcium auf die Elektrodendichte an der Grenzfläche. Die Nachweisgrenze der Methode erfordert zur Detektion von signifikanten U(VI)-Mengen auf der Oberfläche jedoch eine Erhöhung der Ausgangskonzentration um mehr als 2 Größenordnungen gegenüber den Batch-Sorptionsversuchen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Es sollen weitere Batch-Sorptionsuntersuchungen sowie site-selektive TRLFS-Messungen zum Einfluss von Ca²⁺ auf die Radionuklidrückhaltung an Tonmineralen bei hohen pH-Werten durchgeführt werden. Spektroskopische Untersuchungen zur Wechselwirkung von U(VI) mit organischen Liganden unter hyperalkalinen Bedingungen werden fortgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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.* 676, 469-481 (2019)

Philipp, T., Schmeide, K., Rossberg, A., Huittinen, N., Stumpf, T.: Influence of pH, carbonate and calcium concentration on U(VI) retention by clay minerals at (hyper)alkaline conditions – A batch sorption and spectroscopy study. Vortrag: International Conference on Clay Science and Technology – EUROCLAY 2019, 01.-05.07.2019, Paris, France

Philipp, T., Schmeide, K., Stumpf, T.: Influence of calcium on uranium and neptunium sorption on clay minerals at (hyper)alkaline conditions. Vortrag: 2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (RANC 2019), 05.-10.05.2019, Budapest, Hungary

Wolter, J.-M., Schmeide, K., Huittinen, N., Bok, F., Weiss, S., Brendler, V., Stumpf, T.: Leaching of U(VI) and Cm(III) doped calcium (aluminum) silicate hydrate gel (C-(A)-S-H) and tobermorite in saline brines. Poster: 5th International Workshop on “Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions”, 25.-27.03.2019, Karlsruhe, Germany

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 Auswertungen und die Zusammenstellung der experimentellen Daten zu den Th (IV) -, U (VI) - und Nd (III) -Screening-Löslichkeitsexperimenten abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden zuerst einem internen Review-Prozess unterzogen, um dann ein Manuskript für eine Peer-Review-Veröffentlichung zu erstellen. Das Manuskript wird derzeit einem internen Review-Prozess unterzogen, der sich infolge vorübergehender personeller Veränderungen (Elternzeit) im Vorhaben verzögert.

Die Entwicklung des thermodynamischen Modells und die Arbeiten zur Modellierung der Systeme Th(IV)-GLU und Th(IV)-CIT sind beinahe abgeschlossen. Wie bereits berichtet zeigen die Ergebnisse eine Erhöhung der Radionuklid-Löslichkeit mit steigender Ligandenkonzentration (Ligand: Citrat (CIT), Gluconat (GLU)). Letzte Verfeinerungen des Modells verschieben sich infolge vorübergehender personeller Veränderungen (Elternzeit) im Vorhaben in das letzte Quartal der Projektphase.

Die Charakterisierung der Proben mittels NMR aus den Experimenten im binären Ca-GLU-System sind abgeschlossen und die Ergebnisse werden derzeit ausgewertet.

Die Löslichkeitsversuche mit der Festphase $\text{Nd}(\text{OH})_3(\text{s})$ in verdünnten und konzentrierten NaCl und CaCl_2 -Lösungen in Gegenwart von GLU wurden mehrmals beprobt und die Ergebnisse werden derzeit ausgewertet. Für eine vollständige Beschreibung des Systems werden weitere Beprobungen durchgeführt und zusätzliche Proben in diesen Systemen angesetzt. Parallel dazu wurden Cm(III)-Proben spektroskopisch (TRLFS) charakterisiert. Auch hier werden die erhaltenen Ergebnisse derzeit ausgewertet.

Die im Rahmen von AP2 im letzten Halbjahr begonnenen Sorptionsexperimente sind abgeschlossen. Die Experimente zur Sorption von Cm(III) an den Tonmineralien Montmorillonit und Illite in Gegenwart von Gluconat und Citrat wurden mittels zeitaufgelöster Laserfluoreszenzspektroskopie charakterisiert (1 g/L Na-SWy-2, Anwesenheit von 0.01 M GLU und 0.001 M CIT, verdünnte bis konzentrierte CaCl_2 - und NaCl-Lösungen, pH 3 – 12.5). Unter Berücksichtigung aller experimenteller Daten (Batch-Sorptionsexperimente und spektroskopischen Daten (TRLFS)) wurde begonnen ein umfassendes geochemisches Modell aufzustellen. Derzeit laufen noch weitere Anpassungen des Modells.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Einreichen des Manuskripts zu dem An(III)/Ln(III)-GLU-System in verdünnten bis konzentrierten NaCl und CaCl_2 -Lösungen ohne thermodynamische Modellierung.
- Thermodynamische Modellierung des Systems An(III)/Ln(III)-GLU in verdünnten bis konzentrierten NaCl und CaCl_2 -Lösungen.
- Beenden der An(III)/Ln(III)-GLU-Löslichkeitsversuche in konzentrierten MgCl_2 -Lösungen.

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 30.06.2020	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 von Eu(III) und Uranyl, sowie dem Waste Cocktail an Zementstein unter dem Einfluss von Zementzusatzstoffen (2-Phosphono-butan-1,2,4-tricarbonsäure, PBTC) abgeschlossen. An PBTC-haltigem Zement weist Eu(III) unverändert einen sehr hohen Rückhalt auf, sodass kein relevanter Einfluss des bei der Zementherstellung zugesetzten PBTCs auf die Retention von Eu(III) festgestellt werden konnte. Der Rückhalt von Uranyl war in diesen Versuchen leicht vermindert im Vergleich zu den Versuchen an PBTC-freiem Zement. Im Waste Cocktail war der Rückhalt von Eu(III) nahezu unverändert zu den Einzelelementversuchen. Die Retention von Uranyl war bei niedriger Ionenstärke (0,1 M NaCl als Hintergrundelektrolyt) ebenfalls so gut wie unverändert im Vergleich zum Einzelelement. Bei hoher Ionenstärke (verdünnte Gipshutlösung, PW) stieg der Rückhalt von Uranyl im Waste Cocktail an und ist vergleichbar mit dem an Zement ohne PBTC-Zusatz. Cäsium wird an PBTC-haltigem Zement im Waste Cocktail mit steigender Konzentration besser zurückgehalten (0-50 % Rückhalt), vergleichende Einzelelementuntersuchungen laufen noch.

Der Rückhalt von Eu(III) und Uranyl an Zementstein in PBTC-haltiger Lösung (0,01 % PBTC) ist sowohl in 0,1 M NaCl als auch in PW geringer als ohne Zusatzstoff. Ein Grund hierfür kann die Bildung eines löslichen Komplexes zwischen PBTC und den Metallen sein. Die Untersuchungen zum Rückhalt von Cäsium(I) als Einzelelement und des Waste Cocktails an Zementstein in PBTC-haltiger Lösung stehen noch aus.

Die Remobilisierung der Waste Cocktail-Elemente (einzeln und im Gemisch) wurde in jeweils 3-4 Desorptionsschritten (pH 11, 10 und 9) bei drei verschiedenen Ausgangskonzentrationen (100 nM, 2,5 µM und 50 µM) an Opalinuston, Calcigel und Na-Montmorillonit durchgeführt. Unter allen untersuchten Bedingungen (in 0,1 M NaCl und PW) konnte für Eu(III) keine signifikante Remobilisierung beobachtet werden (> 99 % zu Beginn sorbiert, > 98 % nach Desorptionsschritt 3 bzw. 4). An allen drei Tonen desorbiert ein Teil des vorher immobilisierten Uranyls erst beim letzten Desorptionsschritt (pH 10 → 9), aufgrund der Änderung seiner Speziation in diesem pH-Bereich. Cäsium(I) wird von den untersuchten Elementen am stärksten von den Sorptionsplätzen verdrängt. Nach dem ersten Desorptionsschritt wurden bereits bis zu 12 % des sorbierten Cs(I) wieder mobilisiert. Mit weiteren Desorptionsschritten erhöhte sich die Gesamtmenge des remobilisierten Cs(I) zusätzlich.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im nächsten Untersuchungszeitraum werden Arbeiten zu den Arbeitspaketen der Verlängerungsphase AP6 und AP7 durchgeführt. Dazu sollen die bereits durchgeführten Batch-Versuche an Zementstein abgeschlossen und auf Zementalterationsphasen (Calciumsilikathydratphasen, CSH-Phasen) ausgeweitet werden. Auch hier wird der Einfluss von Zementzusätzen (PBTC) auf die Retention von Europium(III), Uranyl und Caesium(I) (einzeln und im Gemisch) untersucht. Des Weiteren sollen dynamische Sorptionsversuche der Metalle an Zementstein und CSH-Phasen mittels MSE-Versuchen durchgeführt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Haben A. (2019): Rückhalt und Desorption von endlagerrelevanten Metallen an Na-Montmorillonit. Bachelorarbeit, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Universität des Saarlandes

Weller A.M. (2019): Untersuchungen zum Rückhalt von endlagerrelevanten Metallen (U(VI), Eu(III), Cs(I)) an Zement unter dem Einfluss hoher Ionenstärke und Zementzusatzstoffen (PBTC). Bachelorarbeit, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Universität des Saarlandes

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

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

Modellierungen zur Sorption von U(VI) in der Zwischenschicht von 11 Å-Tobermorit (AP1.3) wurden fortgesetzt. Modelle für C/S = 0.67 und 1.00 wurden equilibriert und optimiert. Entsprechende Equilibrierungen für C/S = 0.83 werden derzeit durchgeführt. Berechnete Geometrieparameter stimmen ähnlich gut mit EXAFS-Ergebnissen überein wie für 14 Å-Tobermorit.

Für 11 Å-Tobermorit werden im Mittel mehr U-O-Kontakte und kurze U-Si-Abstände des Sorbats zum Substrat erhalten als für 14 Å-Tobermorit, insbesondere für $C/S = 0.67$. Damit ergibt sich für die Sorption von U(VI) in 11 Å-Tobermorit lediglich eine bezüglich der U-Si-Koordinationszahl etwas bessere Übereinstimmung mit dem Experiment als für 14 Å-Tobermorit. Modellierungen zur Sorption von U(IV) in 14 Å-Tobermorit (AP1.3) wurden um den Einbau von U(IV) in die CaO-Schicht der Mineralmodelle erweitert. Im Gegensatz zur Sorption in der Zwischenschicht zeigt inkorporiertes U(IV) nicht eine Verteilung, sondern ein eher diskretes Spektrum von Atomabständen. Die erhaltenen Atomabstände für U(IV) stimmen qualitativ gut mit EXAFS-Messungen der Projektpartner zu Np(IV) und Pu(IV) überein. Wie bei der Sorption von U(VI) werden tendenziell geringere Koordinationszahlen als im Experiment erhalten. Ergebnisse zur Sorption von U(VI) in der Zwischenschicht wurden zur Veröffentlichung eingereicht.

Die Suche nach dinuklearen U(VI)-Carbonatkomplexen $(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3^{2+}$ (AP2.1) wurde auf weitere Varianten der Koordinationszahl und Ligandenanordnung ausgedehnt. Bisherige Ergebnisse liefern drei Isomere mit Energieunterschieden von weniger als 10 kJ/mol, die damit gemeinsam auftreten könnten. In diesen Isomeren bindet das verbrückende Carbonat sowohl mono- als auch bidentat. Im bevorzugten Isomer bindet Carbonat einmal mono- und einmal bidentat an die Uranyleinheiten. Die Dissoziation dieses Komplexes in Uranyl und Uranyl-Monocarbonat wurde als endotherm berechnet. Dies legt es nahe, dass derartige Komplexe zur Speziation von U(VI) beitragen. Während U-U-Abstände in den stabileren Isomeren dieser Komplexe 500 pm und länger sind, eignet sich der charakteristische U-C-Abstand von nahezu 350 pm für monodentat gebundenes Carbonat eventuell zur Identifikation durch EXAFS-Messungen. Ergebnisse zu ternären U(VI)-Hydroxo-Carbonato-Komplexen (AP2.1) wurden zusammengefasst und zur Veröffentlichung eingereicht.

Modellierungen zu ternären Komplexen anionischer U(IV)-Carbonatspezies mit Ca^{2+} (AP2.2) wurden fortgeführt. Für die neutralen ternären Komplexe $\text{CaU}(\text{CO}_3)_3\text{H}_2\text{O}^0$ und $\text{Ca}_2\text{U}(\text{CO}_3)_4^0$, die hinsichtlich der Löslichkeit von U(IV) interessant sind, wurden Isomere betrachtet. Bevorzugt ist für $\text{CaU}(\text{CO}_3)_3\text{H}_2\text{O}^0$ eine zentrale Koordination des Ca^{2+} an alle drei Carbonatliganden gegenüber zweifacher Koordination zwischen zwei Carbonaten oder bidentater an einen Carbonatliganden. Die ungewöhnliche dreifache Ca-Koordination ist um etwa 20 kJ/mol gegenüber der bekannten zweifachen Koordination in ternären Ca-U(VI)-Carbonatkomplexen bevorzugt. Auch für $\text{Ca}_2\text{U}(\text{CO}_3)_4^0$ ist diese Koordination bevorzugt. Eine Modellerweiterung um einen Wasserliganden zur besseren Modellierung der Solvatation der Ca-Ionen hat nur geringe Auswirkungen auf die Ergebnisse.

4. Geplante Weiterarbeiten

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

AP2.1: Carbonatkomplexe

AP2.2: Ternäre Komplexe mit Lösungskationen

5. Berichte, Veröffentlichungen

K. Müller et al.: Interdisciplinary Round-Robin Test on Molecular Spectroscopy of the U(VI) Acetate System, ACS Omega 4 (2019) 8167

Poster: A. Kremleva, S. Krüger, N. Rösch: Quantum Chemical Modeling of U(VI) Sorption on Calcium Silicate Hydrate, 5. Internationaler Workshop Mechanisms and Modelling of Waste/Cement Interactions, 25.-27. März 2019, Karlsruhe

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

Weiterführende Analysen der mittels zeitaufgelöster Laserspektroskopie (TRLFS) erhaltenen Daten für die *pH*-Wert- und Ionenstärke-abhängige Sorption von Eu(III) an Ca-Montmorillonit (AP2) mittels paralleler Faktoranalyse (PARAFAC) unterstreichen die Existenz zweier Eu(III)-Spezies. Diese sind hierbei einer Kantensorption am Ton sowie einer Einbauspezies in eine Sekundärphase zuzuordnen. Die durch PARAFAC separierten spektralen Signaturen zeigen, dass sich die Natur der Sekundärphase nicht wesentlich ändert, sie jedoch mit steigendem *pH*-Wert und Ionenstärke anteilig zunimmt. Testmessungen, bei denen Eu(III) als ausgefälltes Hydroxid dem System zugeführt wurde, zeigten im Verlauf mehrerer Wochen, dass sich die Ergebnisse denen der direkten Zugabe von gelöstem Eu(III) stetig angleichen. Dies spricht für einen Sorptionsablauf, in dem das Hydroxid als Reservoir dient und Eu(III) durch ein Lösungsgleichgewicht der Sorption bzw. dem Einbau zur Verfügung gestellt wird.

Durch Weiterentwicklung und Optimierung des für TRLFS-Tiefenmessungen genutzten OPO-Systems konnten deutliche Verbesserungen im Signal-Rausch-Verhältnis sowie in der Unterdrückung von Streulicht-Signalen erzielt werden, welche zuvor mathematisch eliminiert werden mussten. Hieraus ergibt sich jetzt die Möglichkeit auch vergleichsweise schwache Signale zu untersuchen. So konnten für ein Eu(III)-Modellsystem, diverse, in einem Anregungsspektrum blauverschobene Signale, eindeutig einer Kopplung von Eu(III)-Energieniveaus mit Gitterschwingungen zugeordnet werden (Schwingungsseitenbanden).

Transienten-Absorptionsspektroskopie-Daten (AP4) zur U(VI)-Lumineszenzlöschung in Chlorid- und Bromid-Komplexen ($c_{Cl^-} = 0 \text{ M bis } 1 \text{ M}$ und $c_{Br^-} = 0 \text{ M bis } 0.1 \text{ M}$, *pH* 0, *I* = 1 M) in wässriger Lösung wurden mittels PARAFAC2 analysiert. Der von Chlorid-Ionen in Vorproben ermittelte Löschmechanismus kann in ähnlicher Form auch auf die Bromid-Ionen übertragen werden. Die Ermittlung der entsprechenden Ratenkonstanten und Gleichgewichtskonstanten der sich bildenden Chlorid- und Bromidkomplexe aus diesem kinetischen Modell ist derzeit in Arbeit.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Kopplungen der Eu(III)-Energieniveaus mit Schwingungen und die daraus resultierenden vibronischen Nebenbanden stellen einen zusätzlichen umgebungssensitiven Parametersatz zur Analyse der Eu(III)-Bindungsstellen dar. Es ist geplant entsprechende Untersuchungen an CSH (AP1) und Montmorillonit (AP2) Systemen durchzuführen um weiterführende Rückschlüsse auf den Sorptions-/Einbauprozess ziehen zu können. Untersuchungen des Löschmechanismus von Uranyl(VI) durch Fe(II) mittels Transienten-Absorptionsspektroskopie (AP4) stehen noch aus. Vorbereitung von Spektroelektrochemie.

5. Berichte, Veröffentlichungen

K. Burek, J. Dengler, F. Emmerling, I. Feldmann, M. Kumke, J. Stroh: „Lanthanide luminescence evincing the phase composition in hydrating cementitious systems. ChemistryOpen (2019) eingereicht

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 Actinidenspeziation, 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/Modelligand
- 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 Auswerteroutinen an die Spezifika der Sorption, sorptionskalorimetrische Untersuchungen mit Ln(III) an endlagerrelevanten Phasen (Ton, CSH-Phasen) als $f(\text{pH}, I, \text{Medium})$

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.1:

- Die Untersuchungen zu den Calcium-Aluminat-Hydratphasen (C-A-H) wurden fortgeführt. Nachdem aus dem ersten Ansatz die Proben mit TGA/DSC noch geringfügige Carbonatgehalte aufzeigten, konnte nach Kalzinierung des C3A-Precursors eine reine Katoit-Phase (C3AH6) hergestellt werden. Bei der Synthese weiterer Phasen unter Variierung verschiedener Parameter wurde ein starker Einfluss von Eu(III), c(Additiv) und c(Cl-) auf die Kristallinität der Phasen (mit p-XRD) festgestellt. Mittels TGA/DSC wurde die Bildung von CAH-Phasen, sowie die Abwesenheit von Carbonaten bestätigt. Bei Anwesenheit von Fremdionen kommt es wahrscheinlich zur Bildung von Layered-Double-Hydroxides (LDH). Untersuchungen der C-A-H-Phasen mittels p-XRD zeigten eine Ähnlichkeit zu Ca-Al-Cl-LDH mit Änderungen der Reflexe im sensitiven Bereich der Zwischenschicht von LDH-Phasen. Erste Untersuchungen mittels ²⁷Al-NMR zeigten einen deutlichen Einfluss von Malat (Additiv) und Eu(III) auf die C-A-H-Spektren. Die Ergebnisse deuten auf eine Inkorporation in die Ca-Al-Cl-LDH-Phasen oder/und Bindung in der Zwischenschicht hin. Da LDH-Phasen insbesondere Anionen in der Zwischenschicht binden, ist die Komplexierung von Eu(III) mit Polycarboxylaten zu negativ geladenen Eu(III)-Ligand-Komplexen eine Möglichkeit zur Retardation von Radionukliden.
- Die Untersuchungen zum Einfluss von Eu(III) und Malat auf Calcium-Silikat-Hydrat- (C-S-H) Phasen wurden mittels ²⁹Si- und ¹³C-NMR-Spektroskopie erweitert. Erste Ergebnisse deuten auf eine Polymerisation der Si-Ketten hin. Das Vorliegen eines outer-sphere Sorptionskomplexes von Malat in den C-S-H-Phasen, auch in Anwesenheit von Eu(III), wird bestätigt.
- Die mikro-titrationskalorimetrischen Untersuchungen zur Komplexierung von Eu(III) mit Na-Polyacrylat (Modell-Ligand für Polycarboxylatether-Zementadditive) in Abhängigkeit der Ionenstärke an NaCl, CaCl₂ wurden begonnen. Eine vorläufige Auswertung der kalorimetrischen Titrationskurven erfolgte mit einem Modell, welches von zwei äquivalenten Bindungsplätzen ohne gegenseitige Beeinflussung (A + B + B = AB + B = ABB₂ mit log₁₀K₁/K₂ = -0,602) ausgeht. Dieses Modell ergab die beste Anpassung an die gemessenen Kurven. Analog zu Glenium51 bzw. synthetischen Polycarboxylatethern ist eine deutliche Abnahme der makroskopischen Komplexierungskonstante(n) in Abhängigkeit von I_m zu verzeichnen. Die Größenordnungen der vorläufig bestimmten Komplexierungskonstanten K₁ (z. B. log K₁ ~ 5 bis 5,5 für I = 0.1 m) sind vergleichbar mit denen die für Glenium51 und für synthetische Polycarboxylatether bestimmt worden sind. Die relativ hohen endothermen Reaktionsenthalpien bleiben in Abhängigkeit von I nahezu konstant, sind aber in CaCl₂ deutlich geringer (ΔH₁ ~ 20-25 kJ/mol, Faktor ~ 2) als in NaCl.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Genauere Untersuchung des Einflusses von pH, I_m, [Eu, Mal, Tart] bei der Synthese der Ca-Al-Cl-LDH-Phasen (Phasencharakterisierung mittels pXRD, TGA/DSC, ²⁷Al-NMR)
- Charakterisierung der Inkorporation/Bindung von Eu(III)/Mal/Tart mittels ¹H-, ¹³C-, ²⁷Al-NMR, IR und TRLFS
- Experimente zu Charakterisierung der Sorption von Eu(III), Eu(III)-Malat und Eu(III)-Tartrat an Katoit und Ca-Al-Cl-LDH
- Bestimmung der Komplexbildungskonstanten zur Komplexierung von Eu(III) mit Tartrat als f(pH, I_m)

5. Berichte, Veröffentlichungen

(gemeinsam mit AK P. Panak, Uni Heidelberg)

A. Skerencak-Frech, F. Taube, Pier Luigi Zanonatod, M. Acker, P. J. Panak, P. Di Bernardo: *A potentiometric and microcalorimetric study of the complexation of trivalent europium with lactate: The ionic strength dependency of log βⁿ, ΔrH_{m,n} and ΔrS_{m,n}*, *Thermochimica Acta* 679 (2019) 178316

Vortrag: F. Taube, A. Rossberg, M. Acker, T. Stumpf: *Retention of Ln(III)/An(III)-Malate complexes in CSH phases*, 5nd International Workshop on "Mechanisms and Modelling of Waste Cement Interaction", 25.-27.03.2019, Karlsruhe, Germany

Zuwendungsempfänger: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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: TRIFS 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

Die Komplexbildungsuntersuchungen von NpO_2^+ mit den Dicarboxylaten Oxalat, Malonat und Succinat mittel UV/Vis wurden weitergeführt und ausgewertet. Anhand von Steigungsanalysen konnte für alle Systeme im Temperaturbereich von 20 bis 85 °C die Bildung von 1:1- und 1:2-Komplexen nachgewiesen werden. Die Stabilitätskonstanten bei 25 °C wurden zu $\log \beta^0_1 = 4.53 \pm 0.12$ (Oxalat), $\beta^0_1 = 3.36 \pm 0.11$ (Malonat), $\beta^0_1 = 2.05 \pm 0.45$ (Succinat) und $\log \beta^0_2 = 6.22 \pm 0.24$ (Oxalat), $\beta^0_2 = 3.95 \pm 0.19$ (Malonat), $\beta^0_2 = 0.75 \pm 1.22$ (Succinat) bestimmt. Diese verdeutlichen, dass die Komplexbildungsstärke mit zunehmender Kettenlänge des Kohlenstoffgerüsts in der Reihenfolge Oxalat, Malonat, Succinat abnimmt. Der Einfluss der Temperatur auf das thermodynamische Gleichgewicht der Komplexbildungsreaktionen spiegelte sich in den Speziesverteilungen der einzelnen Systeme wieder. Für Malonat und Succinat wurde mit steigender Temperatur eine sukzessive Verschiebung des Komplexbildungsgleichgewichts zu den komplexierten NpO_2^+ -Spezies beobachtet, während für Oxalat das chemische Gleichgewicht zum NpO_2^+ -Aquoion verschoben wurde. Diese Änderungen in der Speziation mit steigender Temperatur deuten darauf hin, dass die Komplexbildung von Np(V) mit Oxalat exotherm abläuft, während die Komplexbildung mit Malonat und Succinat eine endotherme Reaktionsenthalpie aufweist. Die Temperaturabhängigkeit der mit Hilfe der SIT berechneten thermodynamischen Stabilitätskonstanten $\log \beta_{0i}$ (T) ließen sich mit der integrierten Van't Hoff-Gleichung beschreiben und daraus die Standardreaktionsenthalpien $\Delta_R H^0_{m,i}$ und -entropien $\Delta_R S^0_{m,i}$ der Komplexbildungsreaktionen berechnen. Die so bestimmten thermodynamischen Funktionen bestätigen, dass die Bildung der $\text{NpO}_2(\text{Ox})_n^{1-2n}$ -Komplexe ($n = 1, 2$) mit $\Delta_R H^0_{m,1} = -1.3 \pm 0.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ und $\Delta_R H^0_{m,2} = -8.7 \pm 1.4 \text{ kJ mol}^{-1}$ schwach exotherm erfolgt, während mit steigender C-Kettenlänge der Liganden die Komplexbildung von NpO_2^+ zunehmend endothermer und stärker durch den Zuwachs der Entropie getrieben wird (Malonat: $\Delta_R H^0_{m,1} = 8.3 \pm 0.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ und $\Delta_R H^0_{m,2} = 13.5 \pm 1.1 \text{ kJ mol}^{-1}$, Succinat: $\Delta_R H^0_{m,1} = 13.2 \pm 2.7 \text{ kJ mol}^{-1}$ und $\Delta_R H^0_{m,2} = 47.0 \pm 7.4 \text{ kJ mol}^{-1}$). Darüber hinaus wurden aus der Ionenstärkeabhängigkeit der verschiedenen Komplexbildungsreaktionen die Ioneninteraktionskoeffizienten der jeweiligen Komplexe mit den verwendeten Hintergrundelektrolyten (NaCl und NaClO_4) bestimmt.

Die massenspektrometrischen Untersuchungen der im Rahmen der Kooperation mit der TU Dresden bestrahlten kommerziellen (Glenium 51[®]) und synthetischen (Kooperation mit der TU München, Lehrstuhl Bauchemie) Polycarboxylat-Superplasticizer haben gezeigt, dass unter den verwendeten Bedingungen (27 Tage und 4 Stunden, Dosisleistung von 0.58 kGy/d) keine radiolytische Zersetzung dieser Makromoleküle auftrat.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Strukturelle Charakterisierung der Np(V)-Komplexe mit Oxalat, Malonat und Succinat mittels EXAFS- und ATR-Infrarotspektroskopie.
- Untersuchungen zur Komplexbildung von NpO_2^+ mit α -Hydroxycarboxylat-Liganden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Maiwald, M. M., Skerencak-Frech, A., Panak, P. J.: The complexation and thermodynamics of Np(V) with dicarboxylic ligands, in preparation.

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 30.04.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.04.2019	
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 Verschluss-elementen 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: Arbeiten sind abgeschlossen. Bericht liegt vor.

AP2: Untersuchungen sind abgeschlossen. Erstellen der Berichtsteile.

AP3: Die Belastungen des GV2-Bauwerkes bei konstanter Flüssigkeitsdruck wurden bei 12,6 bar fortgesetzt. Der sich einstellende mittlere Volumenstrom betrug 0,022 l/h. Danach wurde für die Verifizierung der Rückrechnung des Druckkammervolumens der Druck kurzzeitig von 12,5 bar auf ≈ 7 bar reduziert. Dabei wurde austretendes Gas und Fluid aufgefangen (24 Liter Lösung und 0,7 Liter ausgetretenes Gas). Das Gas war in der Flüssigkeit fein verteilt. Trotz verbleibender Unsicherheiten wurde die getroffene Annahme von 433 Liter Gasvolumen in der Druckkammer mit technischer Genauigkeit bestätigt. Anschließend wurde der Druck auf ≈ 17 bar (Volumenstrom 0,06 l/h) erhöht und danach der Versuch bei einem Enddruck von 28 bar (Volumenstrom 2 l/h) abgeschlossen. Durch die TDR-Feuchtesensoren von MFPA Weimar wurden dabei weitere Feuchtezutritte am rechten Stoß, in der Sohle und am linken Stoß festgestellt. In der Firste wurden minimale Feuchteänderungen beobachtet. Gleichzeitig wurden an der Luftseite mehrere Flüssigkeitsaustrittsstellen über die das umliegende Gebirge (ALZ) und die Kontaktzone festgestellt.

In den Bohrungen B38 und B39, die Bereiche mit lokalen Fehlstellen anschnneiden hat sich infolge der Wechselwirkungen zwischen der Lösung und dem MgO-Beton die Lösungspermeabilität mit der Zeit auf einen Wert von $< 10^{-19}$ m² verringert (B38: $2,8 \cdot 10^{-20}$ und B39: $7,5 \cdot 10^{-20}$).

AP4: Abschluss der Untersuchungen.

AP5: Die im Labor untersuchten Spritzbetonrezepturroben haben schon nach 3 Tagen die typisch hohen Festigkeiten erreicht. Eine weitere Festigkeitserhöhung durch die Zugabe von Schmelzbasaltfasern konnte nicht beobachtet werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP5: Abschluss des Vorhabens. Letzte redaktionelle Arbeiten am Abschlussbericht. Versenden des Abschlussberichtes.

5. Berichte, Veröffentlichungen

D. Freyer & T. Popp: MgO - shotcrete for engineered barrier systems in salt formations - in situ tests with inflow of MgCl₂ bearing solution (R&D project MgO-SEAL). Vortrag zum 10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation. Rapid City, 28. – 30. Mai 2019

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 31.03.2022	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 676.496,00 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 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 (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 zwei Verheilungsversuche in FLAC3D mit dem Modell eines keilförmigen Zylinderausschnitts (Öffnungswinkel 11.25°). Die Versuche wurden zunächst ohne und anschließend mit Stahlruckplatten simuliert. Im Modell ohne Platten wurden die Probenenden ohne laterale Behinderung belastet. Daher erfolgte keine Ausbauchung der simulierten Probe. Im Modell mit Platten wurde der Grenzfall einer Haftung der Salzprobe an den Druckplatten angenommen. Dadurch erfolgte eine Ausbauchung ähnlich zu der im realen Versuch. Der Vergleich zeigt deutlich den Einfluss der aus der Endflächenreibung resultierenden inhomogenen Verteilungen der Spannungen, Verformungen, Dilatanz und Schädigung auf zum Beispiel die im realen Versuch integral gemessene Dilatanz. Die Modellierung der Dilatanz, Schädigung und Verheilung mit dem Stoffmodell CDM wurde weiterentwickelt, um die vom Verhältnis der Spannungskomponenten zueinander abhängige Richtungsabhängigkeit der Schädigung und Verheilung, d. h. das richtungsabhängiges Öffnen bzw. Schließen der Mikrorisse in einer Probe, berücksichtigen zu können. Hierzu wurden eine Reihe von Beispielsimulationen durchgeführt.

Im AP5 wurden die Berechnungen mit dem Virtuellen Simulator fortgeführt, mit dem 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 untersucht wird.

Im Berichtszeitraum beteiligte sich der ZE an den Projektworkshops Nr. 17 am 18.-19.02. in Hannover und Nr. 18 am 16.-17.04. in Clausthal. Außerdem stellte der ZE Ergebnisse und die weiteren geplanten Arbeiten des Verbundes auf dem 10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation am 28.-30.05. in Rapid City (SD), USA vor.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Vordergrund der weiteren Arbeiten des ZE werden zunächst in AP2 die Weiterentwicklung der Schädigungs- und Verheilungsmodule im Stoffmodell CDM sowie im AP5 gemeinsam mit den Partnern die Erstellung eines zweiten Demonstratormodells zur intensiven Zugschädigung im untertägigen Steinsalz stehen. Auf den weiteren Projektworkshops werden die Partner ihre Ergebnisse präsentieren und daraus folgende Arbeiten festlegen. Die Workshops Nr. 19 und 20 werden am 04.-05.07. in Braunschweig und 03.-05.09. in Leipzig stattfinden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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 30.09.2021	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.005.576,00 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. März 2019 erfolgte eine Verlängerung des Vorhabens bis 2021.

Das Verbundprojekt weist einen engen thematischen Bezug zum BMWi-Vorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweis-konzeptes“ (KOSINA) auf. Da dort keine Laboruntersuchungen und Weiterentwicklungen der Stoffmodelle durchgeführt werden, bilden die Arbeiten in diesem Verbundprojekt eine notwendige methodische Absicherung und wichtige Ergänzung der in beiden Vorhaben eingesetzten 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 18. bis 19. Februar den 17. Projekt-Workshop in Hannover und am 16. und 17. April den 18. Projekt-Workshop in Clausthal 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) sowie zur Ermittlung der Wirkung einer Vorschädigung auf das Zugversagen (AP3), wozu u. a. die Entwicklung und der Bau von drei neuartigen Versuchsständen für Kriechversuche erfolgte.

Das IfG hat im Berichtszeitraum den 17. und 18. Projekt-Workshop gemeinsam mit den Partnern vorbereitet und durchgeführt. Auf den Workshops wurden die Ergebnisse der bisherigen Planungen und Arbeiten sowie der Zusammenarbeit mit Sandia National Laboratories sowie der BGR (zum AP1) vorgestellt und diskutiert.

Auf beiden 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 von 120 °C auf 40 °C sowie einer abschließenden Temperaturerhöhung auf 60 °C untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass mit dieser Art der Versuchsdurchführung die stationäre Kriechphase vergleichsweise schnell erreicht wird. Dieser Versuch konnte mit dem G/S-Stoffmodell und guter Übereinstimmung nachgerechnet werden.

Im 1. Halbjahr 2019 wurde in den neuen Kriechversuchsständen eine automatisierte Druckregelung abschließend getestet. Gleichzeitig wurde die Klimatisierung in der Versuchskammer verbessert.

Die erste Versuchsserie an den neuartigen Kriechversuchsständen wurde entsprechend dem im Rahmen der Verlängerung des Projektes WEIMOS mit den Partnern abgestimmten Versuchsprogramm bei Deviatorspannungen von 2, 4 und 6 MPa begonnen.

Außerdem verbesserte das IfG die Modellansätze zur Beschreibung des Verheilungsverhaltens auf der Basis der von TUC durchgeführten Laborversuche (AP2) und validierte diese Ansätze durch Nachrechnungen der Versuche sowohl im Rahmen von Prüfkörpermodellen mit und ohne Krafteinleitung über Stahlplatten als auch im Rahmen von Würfelmodellen.

Weiterhin hat das IfG im Berichtszeitraum verbesserte Modellierungen mit dem virtuellen Demonstrator (AP 5) realisiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im 2. Halbjahr 2019 wird die 1. Serie der drei Kriechversuchen an WIPP-Steinsalzprüfkörpern bei Deviatorspannungen von 2, 4 und 6 MPa und schrittweiser Temperaturabsenkung fortgesetzt, die mit 120°C begonnen wurde. Gleichzeitig werden die Laborversuche zur Ermittlung des Einflusses einer Vorschädigung auf das Zugversagen begonnen.

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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 30.09.2021	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 490.473,00 EUR	Projektleiter: Dr. Zapf	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

Das Verbundprojekt weist einen engen thematischen Bezug zum BMWi-Vorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und 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 hat der Zuwendungsempfänger mit dem von ihm verwendeten und während der Projektlaufzeit weiterentwickelten Stoffmodell Lubby-CF die vom Projektpartner TUC vorgeschlagenen Simulationsberechnungen an einem 9-Element-Würfelmodell durchgeführt und die richtungsabhängige Beschreibung des Schädigungs- und Verheilungsverhalten vom Stoffmodell Lubby-CF analysiert. Des Weiteren wurden Nachberechnungen neuer Verheilungsversuche durchgeführt und den Projektpartnern vorgestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Der Zuwendungsempfänger wird weiterhin an den Workshops teilnehmen. Die Simulationsberechnungen an einem Würfelmodell sollen weitergeführt und die Ergebnisse mit den Projektpartnern diskutiert werden. Weiterhin sollen 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 30.09.2021	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 400.307,00 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 Hannover (18.-19.02.) und Clausthal (16.-17.04.) durchgeführt.

Im Berichtszeitraum berechnete der Zuwendungsempfänger zwei Verheilungsversuche an einem Keilmodell mit einem indirekten Lasteintrag über Druckplatten und einem direkten Lasteintrag nach. Außerdem wurden verschiedene Berechnungen zur Schädigung und Verheilung an einem Würfelmodell durchgeführt. Durch eine vormalige Änderung des Verheilungsterms bleiben einige Phänomene zu hinterfragen. Die Formulierung des Verheilungsterms wird daher geprüft und gegebenenfalls angepasst.

Bei der Nachrechnung eines Kriechversuchs, der am IfG durchgeführt wurde, konnten die Messergebnisse durch die Berücksichtigung einer Anfangsporosität von 0,2 % gut abgebildet werden. Mit dem Modell des Virtuellen Demonstrators der LUH wurden Berechnungen durchgeführt, die allerdings ab Einbau des Damms zu numerischen Problemen führen. Möglicherweise ist auch hier die Änderung der Formulierung des Verheilungsterms ursächlich. Dies wird derzeit geprüft.

4. Geplante Weiterarbeiten

Derzeit wird intensiv die Formulierung des Verheilungsterms geprüft. 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 Versuche werden von TUC durchgeführt und sind inzwischen angelaufen. Des Weiteren sind weitere Berechnungen an dem Würfelmodell geplant, um ein besseres Verständnis für die unterschiedlichen Stoffmodelle der Partner zu erlangen.

Die Arbeiten am Modell des Virtuellen Demonstrators laufen weiter. Im Zuge der Verlängerung soll von den Partnern außerdem ein zweiter virtueller Demonstrator modelliert und berechnet werden.

Im September findet neben einem WEIMOS-Workshop auch ein kombinierter Workshop mit dem Forschungsprojekt KOMPASS statt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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 30.09.2021	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 784.171,00 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 18./19. Februar in Hannover, am 16./17. April in Clausthal-Zellerfeld und am 4./5. Juli in Braunschweig die Projekt-Workshops 17 bis 19 durch. Auf den Workshops wurden von den Partnern aktuelle Projektthemen mit Fokussierung auf Arbeiten im AP 2 vorgestellt und diskutiert. Auf dem Workshop in Hannover stellte der Zuwendungsempfänger in diesem Zusammenhang die laborativen Arbeiten zur Schädigungsrückbildung vor. Dabei wurde die dritte Versuchsserie, wie zuvor auf dem 16. Workshop vereinbart, im Januar des Berichtszeitraums beendet. Anschließend wurde die Messtechnik teilweise erneuert, so dass die anschließende Versuchsserie mit Verzögerung Ende Juni gestartet werden konnte. Bei dieser Serie soll erneut das Verheilungsverhalten unter deviatorischer Beanspruchung untersucht werden. Um Messungenauigkeiten hinsichtlich der Dilatanzmessung weitestgehend vorzubeugen, sind vier Versuche zum gleichen Zeitpunkt gestartet worden und werden mit der gleichen Belastungsgeschichte durchgeführt, so dass die Arbeit des Druckregelungssystems, das für alle vier Anlagen über den gleichen Druckzylinder verbunden ist, reduziert wird. Hinsichtlich der numerischen Analyse der laborativen Untersuchungen zeigte der Zuwendungsempfänger Nachrechnungen für die Verheilungsversuche mit einem modifizierten Stoffmodellansatz. Dadurch kann die signifikante Diskrepanz der Schädigungsrückbildung bei unterschiedlichen isotropen Beanspruchungen, die in der letzten Versuchsserie gemessen wurde, deutlich besser abgebildet werden. Darüber hinaus wurden auf den Workshops 18 und 19 die Ergebnisse von zwei Studien mit numerischer Simulation zur Verheilungswirkung gezeigt. Dabei wurde zum einen der Einfluss der Stahl Druckplatten auf die Versuchsergebnisse simuliert und zum anderen die Stoffmodellfunktionalität in ihrer Schädigungs- und Schädigungsrückbildungswirkung durch Simulationen eines würfelförmigen Berechnungsmodells mit verschiedenen Beanspruchungszuständen durchgeführt und die Ergebnisse zwischen den Projektpartnern verglichen und diskutiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Der Zuwendungsempfänger wird weitere numerische Simulationen zum Virtuellen Demonstrator (AP5) durchführen und die erfolgten laborativen Arbeiten auf einem gemeinsamen Workshop mit dem BMWi-Verbundprojekt KOMPASS Anfang September 2019 präsentieren.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.01.2019 bis 28.02.2019	
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 Tonmineralkolloide/-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 d³f++ 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: Der Ausbau der Bentonitquelle mitsamt den enthaltenen Radionukliden (RN) des Long-term In-situ Test (LIT) wurde nach Fixierung der Gelschicht erfolgreich durchgeführt. Es stehen neben dem LIT Mock-up noch zwei weitere, jedoch inaktive, Erosions-Experimente am INE zur Verfügung. Mit diesen kann die geplante Probennahme-Strategie, speziell der Gelschicht, zunächst getestet werden.

Schwerpunkt der Arbeiten im Januar/Februar 2019 lag weiterhin auf der begleitenden Analytik (geochemisches und Kolloid-Monitoring und RN-Messungen) und Interpretation der Proben von LIT, sowie der Analyse erster Proben des i-BET Experiments (Studie des Erosionsverhaltens von Bentonit (MX-80) bei hohem Kompaktierungsgrad) als up-scaling des LIT-Experiments. Die letzten Proben aus dem laufenden Betrieb von LIT wurden für die AMS-Messungen der RN in Wien und München vorbereitet. ^{99}Tc Werte im Bereich von ppq wurden bestimmt. Die Konzentrationen der Aktiniden schwanken zwischen 0,1 ppq bis zu 10 ppq.

Nach Ausbau des LIT-Packers (Durchmesser 360 mm, Länge ca. 800 mm) wurde dieser komplett mittels Computertomographie bei EMPA (CH) gescannt und diese Daten stehen zur Verfügung.

AP2.2: Die thermodynamischen Simulationsrechnungen der Mischwässer sind abgeschlossen und ein Manuskript der deutschen Aktivitäten ist in Vorbereitung. Die im Rahmen des von GRS/KIT organisierten internationalen CFM thermodynamischen Benchmark Kalkulationen sollen in einem nächsten Schritt für eine Veröffentlichung vorbereitet werden. Hier zeigte sich bei einigen internationalen Modellierungsgruppen speziell bei der Verwendung von Silica-Spezies und die Auswahl der Kristallinität der verwendeten löslichkeitsbestimmenden Festphase eine stark unterschiedliche Philosophie.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplanten weiterführenden Arbeiten sind im Antrag zu KOLLORADO-e3 detailliert.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Quinto, Busser, Faestermann, Hain, Koll, Korschinek, Kraft, Ludwig, Plaschke, Schäfer, Geckeis: Ultratrace Determination of ^{99}Tc in Small Natural Water Samples by Accelerator Mass Spectrometry with the Gas-Filled Analyzing Magnet System. *Anal. Chem.* 2019, 91, 4585–4591.

Stoll, Huber, Trumm, Enzmann, Meinel, Wenka, Schill, Schäfer: Experimental and numerical investigations on the effect of fracture geometry and fracture aperture distribution on flow and solute transport in natural fractures. *J. Contam. Hydrol.* 2019, 221, 82-97.

Rinderknecht, Noseck, Schäfer: Integrity of the bentonite barrier for the retention of radionuclides in crystalline host rock - experiments and modeling -(Project KOLLORADO-e2; Final report); KIT scientific report 7757. KIT, Karlsruhe, 2019 (in prep.).

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: 01.01.2019 bis 28.02.2019
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 natur-nahen 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: Zusammenstellung und Dokumentation der Ergebnisse aus allen Arbeitspaketen.

AP3: Erstellung des Projekt-Abschlussberichts.

Erstellung eines Entwurfs zur Publikation mit den Ergebnissen der thermodynamischen Benchmark-Rechnungen von KIT-INE und GRS.

4. Geplante Weiterarbeiten

Keine.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Rinderknecht, F., Noseck, U., Schäfer, F. (eds.): Integrity of the bentonite barrier for retention of radionuclides in crystalline host rock – experiments and modeling. KOLLORADO-e² Final report. KIT Open Report 7757. Karlsruhe 2019

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 30.09.2020	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 2.079.805,00 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, Lokalisierung von Problemen, Programmkommentare, Konventionen, Review des Programmcodes. Die gesamte Entwicklung über alle Phasen wird ausführlich dokumentiert.
- AP5: Verfolgung von Anforderungen aus aktuell laufenden FuE-Projekten.
Die Anforderungen aus den aktuell laufenden FuE-Projekten werden aufgenommen und so weit analysiert, dass eine Entscheidung getroffen werden kann, ob eine Anforderung bei der aktuellen Entwicklung berücksichtigt werden kann oder später, im Rahmen eines separaten Projekts bzw. Arbeitspakets, realisiert werden soll.
- AP6: Berichte zum Projektfortschritt.
Alle durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse werden in Halbjahres- und Jahresberichten sowie im Abschlussbericht dokumentiert.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

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

- InterPore 2019 vom 06.05. bis 10.05. in Valencia (Spanien). Auf der Konferenz wurde ein Vortrag über das Frameworkkonzept zur einfachen Integration von Gleichungen in den existierenden Programmcode gehalten, das im neuen RepoTREND-Nahfeldmodul NaTREND umgesetzt werden soll (s. Abschnitt 5).
- ICMF 2019 (International Conference on Multiphase Flow 2019) vom 19.-24.05. in Rio de Janeiro (Brasilien). Auf der Konferenz wurde das Konzept zu den effizienten Datenstrukturen im Kontext von heterogenen Medien, das in NaTREND realisiert wird, in Form eines Vortrags präsentiert (s. Abschnitt 5).

Im Rahmen des deutsch/russischen Workshops 29.-31.01. in Moskau wurden Perspektiven für eine Zusammenarbeit mit den Entwicklern der Rechencodes GERA und DESTRUCT (Institut für Nukleare Sicherheit IBRAE) diskutiert.

AP2: Unterschiedliche Konzepte für Löser (direkte und iterative) von großen linearen Gleichungssystemen sowie Konzepte für Prekonditionierung einer Gleichungssystemmatrix wurden untersucht, speziell ihre Vor-/Nachteile und Problemaspekte im Kontext der Anwendungsfälle, die für NaTREND relevant sind.

Es wurden Konzepte zur Behandlung spezieller Probleme entwickelt, die bei der Lösung von großen linearen Gleichungssystemen entstehen können, wie z. B.:

- Verschlechterung der Matrixkondition, z. B. infolge der Parameteränderung in einem stark nichtlinearen Bereich oder bei Zeitschrittänderung,
- Nicht-Konvergenz einer Lösung,
- Versagen eines gewählten Löser.

Es wurden potentielle Konzepte zur Realisierung von Randbedingungen evaluiert.

Für einige Anwendungsfälle wird ein Modul *Combiner* benötigt, welches die Ausgabe mehrerer voneinander unabhängig durchgeführter Nahfeld- oder Fernfeld-Rechnungen auf ein gemeinsames Zeitraster interpoliert und zusammenführt. Eine zunächst noch vorläufige Version dieses Moduls wurde konzipiert, entwickelt und getestet.

Zur Generierung eines Rechengitters von einem Modellgebiet wird zurzeit der Gittergenerator blockMesh verwendet, der zwar hochqualitative Rechengitter liefert, jedoch wenig benutzerfreundlich ist. Ein benutzerfreundlicher Gittergenerator soll blockMesh ersetzen oder als Vorbereitungstool für blockMesh benutzt werden. Es wurde mit der Evaluierung von potentiellen Gittergeneratoren begonnen.

AP3: Die im AP2 beschriebenen Konzepte bezüglich der Lösung von Gleichungssystemen wurden umgesetzt. Um umfangreiche Tests durchzuführen, wurden analytische Berechnungen von Systemmatrixbeiträgen zusätzlich zu den bereits vorhandenen numerischen Algorithmen umgesetzt. Die Umsetzung von bereits existierenden Konzepten wurde fortgesetzt.

AP4: Es wurden umfangreiche Testrechnungen zum Analysieren von Problemen bei der Lösung von linearen Gleichungssystemen konzipiert, umgesetzt und durchgeführt.

Mit dem russischen Institut für Nukleare Sicherheit (IBRAE) wurde eine Kooperation vereinbart. Das Ziel ist ein Vergleich der beiderseits angewandten Rechenprogramme zur Analyse der Langzeitsicherheit anhand einfacher Modellsysteme. Als erster Schritt wurde eine Tabelle zur Gegenüberstellung der Fähigkeiten und Eigenschaften der Programme RepoTREND (GRS) und GERA und DESTRUCT (IBRAE) erstellt.

Die entwickelten Konzepte, 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.

Im Rahmen geplantes Benchmarking von RepoTREND mit den Rechencodes GERA und DESTRUCT (IBRAE) soll ein einfaches Modellsystem in mehreren Varianten definiert sowie erste Vergleichsrechnungen durchgeführt werden.

Erkannte Unzulänglichkeiten des Moduls Combiner sind zu beseitigen, weiterhin soll es auch die Ausgaben von Biosphärenrechnungen verarbeiten können. Das Modul ist zu dokumentieren.

Die Arbeiten zur Anbindung des Codes SobolHDMR werden fortgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Tatiana Reiche: Flexible Framework for Two-Phase-Flow in Extremely Heterogeneous Media, 06.-10. Mai, 2019, Valencia (Spain) (<https://events.interpore.org/event/2/contributions/contributions.pdf>).

Tatiana Reiche: Efficient Program Data Structure for Two-Phase-Flow in Extremely Heterogeneous Media, 19.-24. Mai, 2019, Rio de Janeiro (Brazil)

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.023.480,00 EUR	Projektleiter: Schneider

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Mit d^3f und r^3t 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 Grundwasseroberflächen (E-DuR) entwickelt. Durch die Umstellung auf die neue, C++-basierte Plattform UG4 erfuhren die Codes eine deutliche Beschleunigung und wurden zu einem einheitlichen Werkzeug „ d^3f++ “ integriert (A-DuR, H-DuR). Der Code d^3f++ wurde bzw. wird in den Vorhaben WEIMAR, QUADER und SANTOS angewendet.

Das Vorhaben hat 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 zum Ziel. Dazu gehören eine Weiterentwicklung der Lösungsverfahren insbesondere für regionale Modelle mit freier Grundwasseroberfläche, eine weitere Beschleunigung und eine breitere Anwendbarkeit. Letzteres soll neben Verbesserungen in Benutzeroberfläche und Präprozessor durch die Einführung eines Speicherterms geschehen, dessen Implementierung in d^3f++ eine genauere Modellierung kurzfristiger Prozesse ermöglicht.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

- AP1: Anwendungs- und Vergleichsrechnungen
- AP2: Erweiterung des Anwendungsbereichs d^3f++
- AP4: Projektleitung und Dokumentation

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.1: Äspö Task 9

- Die Arbeiten zum Long-Term Diffusion Experiment (LTDE, Task 9b) wurden fortgesetzt und weitgehend abgeschlossen. Dabei wurde versucht, die Messdaten rigoros durch ein Transportmodell mit Diffusion und linearer Sorption zu erklären. Mit einem homogenen

Modell war dies nicht möglich. Unter Einbeziehung einer dünnen Zone am Zustromrand mit anderen Materialeigenschaften ist eine Modellanpassung an die Daten jedoch gelungen.

- Die in diesem Zusammenhang relevanten Erkenntnisse zum Skin-Effekt aus dem diesbezüglichen Workshop der Task Force in Prag wurden als Bericht GRS-504 veröffentlicht.

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

- Die Modellrechnungen an einem regionalen vertikalen 2D-Schnitt wurden unter Berücksichtigung der freien Grundwasseroberfläche in Kombination mit eindringendem Meerwasser, Grundwasserneubildung und Vorflutern fortgesetzt.
- Eine 3D-Modellgeometrie wurde aufgebaut. Mit den Rechnungen wurde begonnen.

AP1.3: Deckgebirge der WIPP Site, New Mexico

- Die Rechnungen wurden fortgeführt. Die Ergebnisse wurden auf dem Deutsch-Amerikanischen Workshop im Mai 2019 in Rapid City vorgestellt.

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

- Das in enger Anlehnung an das Modell von SÚRAO aufgebaute Regionalmodell Čihadlo wird zurzeit kalibriert.

AP4: Projektleitung

- Das sechste Projektstatusgespräch fand am 28.06.2019 bei der GRS in Braunschweig statt. Dabei wurde der aktuelle Stand der Arbeiten vorgestellt sowie die zeitliche Planung der restlichen Arbeiten und der Erstellung des Abschlussberichtes besprochen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1.1: Abschluss der Arbeiten an Task 9

AP1.2: Kalibrierung des 3D-Regionalmodells

AP1.3: Abschluss der Rechnungen zur WIPP-Site

AP1.4: Kalibrierung des Regionalmodells Čihadlo, Abschluss der Rechnungen

AP4: Der Projekt-Abschlussberichtes wird erstellt

5. Berichte, Veröffentlichungen

Wolf, J., Schneider, A., Kuhlman, C.: Basin-Scale Density-Dependent Groundwater Flow, Presentation, US-German Workshop, Rapid City, SD, United States, May 28-30, 2019

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 31.07.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

In den numerischen Experimenten mit der WIPP Site wurde versucht, optimale Parameter für die Rechenalgorithmen zu bestimmen. Das Problemgebiet besitzt eine komplizierte Konstellation der geologischen Schichten, was für die Numerik einige Schwierigkeiten darstellt. Insbesondere wurden durch die Verbesserungen in der Implementierung des Level-Set-Verfahrens grössere Zeitschritte und längere Modellzeiten erreicht.

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

d^3f_{++} enthält eine Kluft-Implementierung, in der Klüfte als Mannigfaltigkeiten mit einer Dimension weniger als das Rechengebiet dargestellt werden. Dies bedeutet, dass die Dicke einer Kluft nicht im Rechengitter aufgelöst, sondern nur in der Diskretisierung berücksichtigt wird. Ein solches Vorgehen ist statthaft, wenn man die Dicke der Klüfte gegenüber der Größe des Rechengebietes insgesamt vernachlässigen kann, und hat den Vorteil die Gittererzeugung stark zu vereinfachen. Die resultierenden Gitter wirken sich auch sehr positiv auf die Konvergenz des Mehrgitterverfahrens aus. Diese im Strömungsteil von d^3f_{++} bereits vorhandene Kluftbehandlung wurde nun auch für den Transportteil von d^3f_{++} realisiert und anhand des bekannten Henry-Problems getestet. Die Ergebnisse entsprechen dabei den Erwartungen.

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

Bei der Simulation der freien Oberfläche wurden Verbesserungen in der Zeitschrittlänge erreicht. Da bei der Diskretisierung der hyperbolischen Gleichungen des Level-Set-Verfahrens und Hilfsaufgaben ein explizites Schema verwendet wird, muß dabei auf die CFL-Bedingung geachtet werden. Einerseits wird erwartet, dass diese Bedingung in den bestehenden Problemen nicht restriktiv ist, da die freie Oberfläche annähernd im stationären Zustand sein soll und sich nur langsam bewegt. Andererseits wird für das Level-Set-Verfahren die global definierte Geschwindigkeit benötigt, und die Qualität der Ausbreitung der Geschwindigkeit beeinflusst die Courant-Zahl. Während dieser Phase des Projektes wurde die Implementierung der Auswertung der Courant-Zahl in der Diskretisierung der hyperbolischen Gleichungen auf den unstrukturierten Gittern überarbeitet. Ausserdem wurden für die Ausbreitung der normalen Geschwindigkeit besser passende Parameter für die Lösung der Probleme gefunden. Dies ermöglichte die effektive Courant-Zahl zu optimieren, was zur Vergrößerung der Zeitschrittlänge geführt hat.

Um Vorhersagen in großräumigen Modellgebieten durchführen zu können, müssen die Modelle zunächst anhand historischer Daten kalibriert werden. Basierend auf dieser Ausgangskonfiguration können dann Variationen durchgeführt werden. Beispielsweise ist hierbei eine robuste und stabile Position der freien Oberfläche ein kritischer Parameter. Der Prototyp eines entsprechenden Schätzers wurde entwickelt. Vorläufige Test wurden für transiente Vorgänge durchgeführt. Permeabilitäten, Porositäten und Grundwasserneubildung in unterschiedlichen Teilgebieten können damit angepasst werden. Zudem liefert das Verfahren die räumlichen Sensitivitäten der freien Oberfläche bzgl. der Parameter. Beim Entwurf der Schnittstelle wurde darauf geachtet, dass zukünftig eine Kopplung mit LIMEX ermöglicht wird. Entsprechende Test stehen jedoch noch aus.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden entsprechend der im Antrag angegebenen Vorgehensweise fortgesetzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Nägel, A., Deuflhard, P., Wittum, G. (2018): „Efficient Stiff Integration of Density Driven Flow Problems“ (in Begutachtung, verfügbar als ZIB-Report 18-54)

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 30.09.2020	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 469.799,00 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 ersten Halbjahr 2019 durchgeführt.

AP3: Mit der in BASEL entwickelten Vorgehensweise wurden für die Teilsysteme „Grubenbaue außerhalb der Einlagerungsbereiche“ sowie „Einlagerungsbereiche“ aus der Analyse der Einwirkung der Prozesse auf die Komponenten Einwirkungen von Innen (EVI) abgeleitet und beschrieben. Diskussion der Ergebnisse mit der BGE Technology in gemeinsamen Gesprächen am 14.1., 4.3., 6.3., 1.4., 2.4. und 15.5.2019.

AP4: Es wurden keine Arbeiten zu AP4 im ersten Halbjahr 2019 durchgeführt.

AP7: Bereits fertige Ergebnisse wurden in den Abschlussbericht integriert, insbesondere wurden die abgeleiteten EVI in dem Berichtsentwurf „Ableitung von Einwirkungen von Innen für die Betriebsphase für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle“ dokumentiert. Vorstellung der Ergebnisse auf dem 2nd Plenary Meeting des Vorhabens GEOSAF-III am 25.6. bei der IAEA in Wien. Diskussion der Ergebnisse aus dem Vorhaben GEOSAF-III für die Vorgehensweise im Vorhaben BASEL.

Die Arbeiten in AP6 (Synthese) wurden noch nicht begonnen. Die Arbeiten zu AP1 und AP5 (Überprüfung der Ergebnisse am Ende des Vorhabens) sind abgeschlossen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: Die noch verbleibenden Arbeiten in diesem AP werden auf Grund der Verlängerung des Vorhabens BASEL in das Jahr 2020 verschoben.

AP3: Zusammenstellung der FEP für das Teilsystem „Übertägige Anlagen“. Ableitung der EVI für dieses Teilsystem. Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung der Kombination von EVI (alle Teilsysteme). Identifizierung von Maßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung der Konsequenzen der abgeleiteten EVI (alle Teilsysteme).

AP4: Bewertung der EVI hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Langzeitsicherheit.

AP6: Die Arbeiten in diesem AP (Synthese aus den AP2 bis AP5, Vorschläge zum methodischen Vorgehen) werden auf Grund der Verlängerung des Vorhabens BASEL in das Jahr 2020 verschoben.

AP7: Es wird ein separater Bericht zu der Ableitung von EVI erstellt. Fortführung der Dokumentation der Arbeiten in dem Berichtsentwurf „Ableitung von Einwirkungen von Innen für die Betriebsphase für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle“.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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 30.09.2020	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 598.901,22 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 technische Beschreibungen der übertägigen Anlagen und der Betriebsabläufe für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente (HAW) in den Wirtsgesteinen (Salz, Ton und Kristallin) im Entwurf erstellt.
- AP3: Die FEP-Liste für die Betriebsphase (untertägige Anlagen) wurde entsprechend der Ergebnisse der Diskussion bei der systematischen Ableitung der Einwirkungen von Innen (EVI) vervollständigt.
- AP5: Die Bewertung der Nachverschlussphase hinsichtlich ihrer möglichen 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 Entwurf des Abschlussberichtes integriert. Außerdem wurden die bisherigen Ergebnisse des Vorhabens am 24./28.6.2019 auf dem GEOSAF III Plenary Meeting in Wien präsentiert (siehe 5.).

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Das Referenzkonzept für die übertägigen Anlagen eines Endlagers wird dem Projektpartner vorgestellt und mit ihm diskutiert.
- AP2: Das Sicherheits- und Nachweiskonzept wird detaillierter ausgeführt.
- AP3: Es soll ein FEP-Katalog für die übertägigen Anlagen eines Endlagers erstellt werden. Auf Grundlage dieses FEP-Katalogs sollen dann die EVI systematisch abgeleitet werden.
- AP6: Die Methodik zur Ableitung der EVI soll weiterentwickelt werden.
- AP7: Die Berichtserstellung zum Gesamtvorhaben BASEL wird fortgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Noseck, U., Lommerzheim, A., Wolf, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Förster, B., Herold, P., Leonard, J., Filbert, W. & Prignitz, S. (2019): Investigation of the Impacts of the Operational Phase on Post-Closure Safety by a FEP Analysis. GEOSAF (Part III) – Third Plenary Meeting, Vienna, Austria, 24 to 28 June 2019

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 30.04.2020	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.008.044,00 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
- AP5: Kombinierte elektrochemische Versuche mit Synchrotron XPS-Analysen
- AP6: Vorexperimente zur Korrosion in Porenwasser-Bentonit-Milieus

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Elektrochemische Untersuchungen (AP2)

Die Korrosionsuntersuchungen von Edelstahl AISI 309S in NaCl- und MgCl₂-gesättigten Lösungen (Q3 bzw. Q2) zeigen unterschiedliche Korrosionsmechanismen. Diese liegen der Stabilität der passiven Oxidschicht zugrunde, die durch die Anwesenheit von Sulfationen in der Q3-Lösung erhöht wird. Die Entwicklung des lokalen pH-Wertes mag ebenfalls sehr unterschiedlich in beiden Lösungen zu sein. Diese spielt eine wesentliche Rolle beim Wachstum der Korrosionsmulden in Sulfat-haltiger Q3-lösung, die aufgrund des durch Chloridionen verursachten Durchbruchs der Oxidschicht entstanden sind. Um mehr Information über die Wir-

kung des lokalen pH-Wertes und der Sulfationen in dem Korrosionsmechanismus, Elektrochemie-Experimente in NaCl- und Na₂SO₄-Lösungen mit unterschiedlichen pH-Werten wurden gestartet.

Chemische und morphologische Charakterisierung (AP3)

Die im letzten Bericht angekündigten Untersuchungen der kristallographischen Struktur des Stahls mittels Ätzen wurden vorläufig angehalten. Grund dafür sind die nicht zufriedenstellenden Ergebnisse, trotz des intensiven Experimentierens. Daher wird erwogen, das Unterechtechnikumsinstitut der Leibniz-Universität Hannover mit diesen Arbeiten zu beauftragen, da diese Einrichtung über die Expertise und die apparative Ausrüstung verfügt.

Die nach manchen Langzeit-Korrosionsuntersuchungen verwendete Salzlösungen wurden durch UV-Vis-Spektroskopie analysiert. Damit wird angestrebt, Information über die Auflösungsprozesse während der Stahlkorrosion zu gewinnen. Dafür wurden Kalibrierungskurven von Fe(II), Ni(II) und Cr(III) durchgeführt. Wegen der geringen Absorption von Fe(II)-Lösungen, wird eine auf die Verwendung von Komplex-bildendem Phenanthrolin basierte Messmethode für die spektroskopische Bestimmung von Fe(II) eingeführt.

Kombinierte elektrochemische Versuche mit Synchrotron XPS-Analysen (AP5)

Die chemischen Änderungen der Stahl-Oberfläche in den ersten und Langzeitstadien der Korrosionsprozesse in Q3- und Q2-Lösungen wurden mittels sogenannten in-system-Experimente in einer elektrochemischen Zelle an einer Synchrotron-XPS-Anlage am Bessy II, Berlin, durchgeführt. Dadurch konnte man eine genauere Einsicht in die chemischen Änderungen an dem äußersten Teil der Oxidschicht während der ersten Stadien der lokalen Korrosion gewinnen. Die Ergebnisse werden zurzeit ausgewertet.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Vervollständigung der Korrosionsuntersuchungen in NaCl- und Na₂SO₄-Lösungen mit verschiedener pH-Werten
 - Design und Konstruktion einer Zelle zur Langzeit-Korrosionsuntersuchungen an einem Porenwasser-Bentonit-Milieu
 - 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 mechanisms of austenitic steel in salt rock repositories of high-level radioactive waste, A.G. Muñoz, D. Schild, Oral presentation at the 235th Meeting of The Electrochemical Society, May 26th-30th 2019, Dallas, TX

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 30.11.2019	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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: Im Berichtszeitraum wurden erste elektrochemische Untersuchungen zur Stahlkorrosion unter anoxischen Bedingungen bei Raumtemperatur durchgeführt. Mittels potentiodynamischer Messungen in Abhängigkeit vom Salzgehalt der Lösungen (NaCl, MgCl₂) konnten Korrosionsrate, Korrosionspotential (E_{corr}), Korrosionsstrom (i_{corr}) und der Polarisationswiderstand (R_p) be-

stimmt werden. Erste Ergebnisse zeigen niedrigeres E_{corr} für den C-Stahl verglichen mit dem CrNi-Stahl, eine gleichmäßige Korrosion des C-Stahls, sowie Passivierung gefolgt von Lochfraßkorrosion für den CrNi-Stahl. Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die Abnahme von E_{corr} mit zunehmender Cl-Konzentration für beide Stähle.

AP2: Die Korrosionsexperimente für CrNi- und C-Stahl bei hoher Ionenstärke in NaCl oder MgCl_2 (10 Monate bei 90°C , anoxische Bedingungen) wurden beendet. Für den C-Stahl wurde die Bildung von Fe-Silikaten und Magnetit (Umwandlung von Fe-Hydroxichlorid) im NaCl-Medium beobachtet, während in MgCl_2 nur Fe-Hydroxichlorid identifiziert wurde. In NaCl konnte kein Angriff des CrNi-Stahls festgestellt werden, während die Daten auf die Bildung von Cr_2O_3 in MgCl_2 hindeuten. Die Auswertung der Daten von XAS Messungen an einer Synchrotronquelle stimmen mit anderen Laboruntersuchungen überein. Für CrNi-Stahl in NaCl konnte die Bildung von Cr_2O_3 und NiFe_2O_4 nachgewiesen werden.

Die Modellierung der Sorptionsdaten von Eu(III) an Magnetit bei verschiedenen Ionenstärken wurde mit der Entwicklung eines neuen MUSIC-Modells erfolgreich abgeschlossen. Die Arbeiten deuten auf die Bildung tridentater Eu-Komplexe an Oktaedern der Magnetitstruktur hin, was mit XAS Daten übereinstimmt. Sorptionsexperimente mit weiteren Korrosionsphasen (NiFe_2O_4 , Fe-Hydroxichlorid) wurden ebenfalls durchgeführt. Für beide Phasen nimmt die Sorption mit dem pH zu, eine signifikante Ionenstärke-Abhängigkeit konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Basierend auf quantenchemischen Rechnungen (DFT) von Grünem Rost $\text{GR}(\text{CO}_3)$ wurden von KIT-INE Analysen zu $\text{GR}(\text{Cl})$ durchgeführt und die Form der Einheitszelle sowie die Position der Ionen darin bestimmt. Die quantenchemischen Analysen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit verfügbaren experimentellen Ergebnissen.

Im Rahmen der Verlängerungsphase wurden Versuche zur Stahlkorrosion in Tongestein begonnen. In einem verschließbaren Gefäß wurden in einen Ofen bei 65°C CrNi- und C-Stahl mit einer Tonsuspension kontaktiert. Um Informationen nach verschiedenen Kontaktzeiten (z. B. 1, 2, 6 Monaten) zu erhalten wurden verschiedene Parallelversuche angesetzt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Elektrochemische Korrosionsversuche sollen bei verschiedenen Potentialen gestoppt, und die Proben mittels mikroskopischer und spektroskopischer Methoden untersucht werden. Die Arbeiten sollen Informationen zu den gebildeten Sekundärphasen und Änderungen der Oberflächenmorphologie in Abhängigkeit des Potentials liefern.

AP2: Die Korrosionsexperimente bei Raumtemperatur sollen abgeschossen werden. Die Auswertung der experimentellen Daten wird fortgesetzt. Es soll die Modellierung der Sorptionsdaten von Eu an NiFe_2O_4 und Fe-Hydroxichlorid erfolgen.

Zusätzliche quantenchemische Analysen zur theoretischen Untersuchung des I⁻ Einbaus in $\text{GR}(\text{Cl}^-)$ sowie Rechnungen von $\text{GR}(\text{Br}^-)$ sollen erfolgen.

Im Rahmen der neuen Arbeiten in der Verlängerungsphase sollen die Experimente bei 1 bzw. 2 Monaten Kontaktzeit beendet, und die Proben analysiert werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Zwei Manuskripte von N. Morelova (Doktorandin von KIT-INE in KORSO) sind in Vorbereitung. Vortrag N. Morelova („Studies on Fe corrosion in brine systems“) auf der ABC-Salt VI Tagung (Karlsruhe, D)

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 (FKZ: 02 E 11537), die BGE TECHNOLOGY GmbH für AP2 und AP3; AP5 wird gemeinsam von beiden Partnern bearbeitet.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zum AP1-Bericht (Nationaler und internationaler Stand zu Behälterkonzepten und -anforderungen) vom Projektpartner BAM hat BGE TECHNOLOGY im Berichtszeitraum abschließende Kommentare diskutiert und mit dem Projektpartner abgestimmt.

Der abgeschlossene und abgestimmte Bericht zum AP2 "Ermittlung der behälterrelevanten Randbedingungen und Beanspruchungsgrößen für Endlagerbehälter in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein in Deutschland" wurde in die interne Freigabe gegeben.

Der Berichtsentwurf zum AP3 "Herleitung und Zusammenstellung der Anforderungen an Endlagerbehälter für ein HAW-Endlager in den drei potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein" wurde einem externen Review unterzogen. Grundsätzlich wurde der entwickelte Top-Down-Ansatz zur Herleitung von Anforderungen, Behälterfunktionen und Einwirkungen bestätigt. Die eingebrachten Anregungen und Verbesserungsvorschläge insbesondere zur Herleitung quantifizierter Einwirkungen wurden aufgenommen und der Bericht entsprechend angepasst. Die revidierte Fassung wurde erneut mit dem Partner BAM diskutiert.

In regelmäßigen Projektgesprächen (29.01. und 20.06.2019) sowie in einer Telefonkonferenz (12.04.2019) wurde der Arbeitsfortschritt mit dem Partner BAM ausgetauscht, diskutiert und das weitere Vorgehen abgestimmt.

Die Struktur, der Inhalt und der geplante Umfang des Syntheseberichts (AP5) wurden mit dem Partner BAM festgelegt und mit der Dokumentation der Ergebnisse begonnen.

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.

Darüber hinaus wird BGE TECHNOLOGY GmbH die geplanten Ausarbeitungen von BAM zum AP4 (Ideen und erste vorläufige Behälterkonzepte) fachlich begleiten.

Einen weiteren Schwerpunkt wird die gemeinsame Synthese der erzielten Vorhabensergebnisse in den Abschlussbericht darstellen. Dazu werden die AP-Ergebnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen formuliert.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Die Grundzüge des Vorhabens und erste Ergebnisse zum AP3 (Herleitung der Anforderungen) wurden auf dem 10. US-German Workshop vom 28. bis 30. Mai 2019 in der School of Mines in Rapid City, South Dakota (USA) 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 (FKZ: 02 E 11527); AP5 wird gemeinsam von beiden Partnern bearbeitet.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Der Berichtsentswurf wurde in enger Abstimmung mit dem Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY (vormals DBE TECHNOLOGY) nochmals überarbeitet und finalisiert.
- AP2: Der vom Kooperationspartner für das Arbeitspaket 2 erstellte Berichtsentswurf wurde vollständig durchgesehen und mit Korrekturvorschlägen und Textanmerkungen zur Erstellung der finalisierten Fassung versehen.
- AP3: Mit der Prüfung des vom Kooperationspartner für das Arbeitspaket 3 erstellten vorläufigen Berichtsentswurfes wurde begonnen und erste Ergebnisse an BGE TECHNOLOGY übermittelt. Ergänzend wurden seitens der BAM zusätzliche Informationen z. B. zu Mikroben im Wirtsgestein Salz zusammengestellt und übermittelt. Weiterhin wurde in Abstimmung mit BGE TECHNOLOGY ein Arbeitspapier zum Thema „Bergung als ungeplante Notfallmaßnahme bei der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle: Auswirkungen auf Behälterkonzepte“ erarbeitet.
- AP5: In weiteren drei Projektgesprächen mit dem Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY wurden der Projektfortschritt erörtert und die weiteren Arbeitsschritte vereinbart.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Finalisierung des Berichtes zum AP1 unter Hinzufügung eines Fazits mit einer Kurzzusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse.
- AP2: Unterstützung der BGE TECHNOLOGY bei der Finalisierung des Berichtes zum AP2.
- AP3: Unterstützung der BGE TECHNOLOGY bei der abschließenden Erarbeitung des Berichtes zum AP3 unter Berücksichtigung internationaler Referenzen aus dem Bericht zum AP1.
- AP4: Erarbeitung des Berichtes zum AP4 unter Berücksichtigung der im AP3 erarbeiteten Ergebnisse bzgl. der Anforderungen, Einwirkungen und Behälterfunktionen. Im Hinblick auf Erfüllung der Anforderungen durch bereits entwickelte bzw. betrachtete Behälterkonzepte sowie ggf. denkbare neue Behälterkonzepte für die drei potenziellen Wirtsgesteine.
- AP5: Der Vorhabenfortschritt wird im Rahmen der regelmäßigen Projektgespräche mit dem Kooperationspartner BGE TECHNOLOGY erörtert und dokumentiert. Ein Workshop zur Vorstellung und Diskussion der vorläufigen Projektergebnisse wird gemeinsam mit BGE TECHNOLOGY avisiert.
Erarbeitung des Abschlussberichtes (Synthesebericht) gemeinsam mit BGE TECHNOLOGY zur Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sowie der daraus insgesamt abgeleiteten Schlussfolgerungen.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 448.984,00 EUR	Projektleiter: Dr. Brohmann	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

Das AP1 war – wie bereits berichtet – im Herbst 2018 beendet. Die Ergebnisse wurden im AP1-Bericht vom 25.09.2018 detailliert diskutiert.

In AP3 werden bestehende Konzepte und Erfahrungen aus reversiblen (Entscheidungs-)Prozessen zusammengetragen und mit unterschiedlichem methodischem Repertoire vertieft betrachtet. Die gewonnenen Erkenntnisse werden vor dem Hintergrund des im StandAG skizzierten selbsthinterfragenden und lernenden Verfahrens und der vorgesehenen partizipativen Einbindung der Öffentlichkeit diskutiert.

AP3.1 + AP3.2: Um die Analyse von Konzepten und Ansätzen reversibler Entscheidungsprozesse zu vertiefen, wurden im Berichtszeitraum Interviews mit Vertreter*innen verschiedener Akteursgruppen durchgeführt. Der Fokus der Gespräche lag auf Erwartungen zur Öffentlichkeitsbeteiligung und Perspektiven auf Reversibilität. Die Erwartungen an die Prozessgestaltung und an die verantwortlichen Institutionen sind durchgängig sehr hoch, unabhängig vom jeweils eigenen Erfahrungskontext. Die Akteure – Entscheider wie auch Stakeholder – gaben wichtige Gestaltungshinweise.

Die Ergebnisse der Recherchen zu zwei zentralen Aspekten von Reversibilität in Entscheidungsprozessen, „Expertenstreit“ und „Organisationsentwicklung“, wurden ausgewertet und im AP3 Bericht diskutiert.

Es fanden im Berichtszeitraum insgesamt zwei Projektgespräche der Verbundpartner statt (eine Telefonkonferenz und ein Projekttreffen in Berlin) sowie mehrere abstimmungsbezogene Telefonkonferenzen zwischen Themenverantwortlichen und zwischen AP-Leitungen.

Zur Unterstützung der arbeitspaket- und disziplinübergreifenden Zusammenarbeit wurde das Format der Tandems weiterverfolgt. Hier wurde insbesondere hinsichtlich der Entwicklung „einheitlicher“ Definitionen und ab-

gestimmter Begriffe diskutiert. Dies geschah auch im Hinblick auf die Zusammenführung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen in AP5, in welchen übergreifende Fragestellungen wieder „rückbindbar“ sein müssen.

Am 28.05.2019 wurde in Berlin der 2. transdisziplinäre Projektworkshop „Robuste Governance in der Endlagerpolitik – Akteure, Prozesse, Entscheidungen“ von allen Partnern gemeinsam vorbereitet und durchgeführt.

Ziel war die Präsentation und Diskussion von (Teil-)Ergebnissen aus den einzelnen Arbeitspaketen.

Das Öko-Institut übernahm eine Präsentation zu dem Themenfeld „Reversibilität in Entscheidungsprozessen – warum brauchen wir ein lernendes Verfahren?“ als Diskussionsinput sowie die Leitung einer Arbeitsgruppe und Moderation.

Die Vorträge, Diskussionsbeiträge und Inhalte der Arbeitsgruppen wurden dokumentiert und in einem ausführlichen Ergebnisprotokoll zusammengeführt. Die Veranstaltung stieß bei teilnehmenden Behörden- und Institutionenvertretern auf große Resonanz und erhielt ein rundweg positives Feedback.

Im Berichtszeitraum wurden organisatorische und konzeptionelle Vorbereitungen für die Abschlusskonferenz des Vorhabens am 12.2.2020 in Berlin eingeleitet.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3.1 + 3.2: Auswertung der durchgeführten Interviews sowie Zusammenfassung und Interpretation der bisherigen Ergebnisse; Weiterentwicklung des AP3 Berichts

AP3.3: Reflexion und Zusammenführung von Schlussfolgerungen aus AP3.1 und 3.2 zur Vorbereitung von Handlungsempfehlungen; Mitarbeit an einem AP übergreifenden Beitrag zur Rolle von Expertendissensen in politischen Entscheidungsprozessen am Beispiel der Zwischenlagerung in Deutschland (in Zus.arbeit mit FFU)

Auswertung des arbeitspaketübergreifenden Workshops (WS 2), ebenfalls zur Vorbereitung von Handlungsempfehlungen und AP5 Bericht

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

AP5: Erstellung eines Sammelbandes mit folgenden Beiträgen vom Öko-Institut (tlw. in Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern):

- Zu Begriff und Genese von Reversibilität in verschiedenen disziplinären Kontexten (Roman Seidl, Melanie Mbah, Saleem Chaudry)
- Herausforderungen lernender und sich selbst hinterfragender Langzeit-Verfahren und Möglichkeiten organisationaler Innovationen der beteiligten Institutionen (Roman Seidl, Melanie Mbah, Bettina Brohmann, Saleem Chaudry)
- Der Einfluss lernender und sich selbst hinterfragender Langzeit-Verfahren auf die Organisation beteiligter Institutionen (Melanie Mbah, Bettina Brohmann)
- Expertendissens: Theoretische Ansätze und praktische Erfahrungen (Dörte Themann, Daniel Häfner, Saleem Chaudry, Roman Seidl)
- Professionelle “Checks and Balances” und das Denken in Alternativen. Herausforderungen für ein lernendes Verfahren und Institutionen in einer polarisierten Gesellschaft (Arbeitstitel) (Peter Hocke, Melanie Mbah, Roman Seidl)
- Mitarbeit am Beitrag „Gesellschaftliche Wahrnehmung von soziotechnischen Belangen“ - Auswertung der Interviews mit Stakeholdern und zivilgesellschaftlichen Akteuren
- Mitarbeit am Beitrag „Der socio-technical Divide - Zur unterschiedlichen Interpretation und Nutzung von zentralen Begriffen des Endlagerdiskurses“

Weitere Vorbereitung der Abschlusskonferenz im Februar 2020;

Zusammenstellung der Beiträge zur Abschlusspublikation des Vorhabens.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag “The German Site Selection Procedure for a Final Repository for High-level Waste – Characteristics of a Participatory, Self-reflecting and Learning Procedure” von Saalem Chaudry/Melanie Mbah/Bettina Brohmann/Peter Hocke bei der European Geological Union am 8.4.2019 in Wien

Posterpräsentation „Learning from other cases from nuclear waste siting“ auf der modern2020 Konferenz am 10.04.2019 in Paris (Saleem Chaudry/Roman Seidl)

Die vom FFU in Kooperation mit dem Netzwerk für Nukleares Gedächtnis (NeNuG) durchgeführte Ringvorlesung „Der Atomkonflikt in Deutschland – bis in alle Ewigkeit?“ im Rahmen des Offenen Hörsaals an der Freien Universität Berlin (10.04.-10.07.2019) wurde in der Planung und Umsetzung unterstützt (Konzeption; Referentenaquise; Moderation)

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

- AP4: Konzeptionell aufbauend auf dem AP1-Bericht, wurde die Betrachtung des Endlagers als Großinfrastrukturprojekt vertieft. Der Beitrag ist inzwischen veröffentlicht (Hocke/Brunnengräber 2019).
- AP4.1: Das Manuskript eines Journalbeitrags (Mbah/Kuppler 2019) zu Grundlagen der Long-term Governance wurde fertiggestellt und eingereicht. Ein weiterer Beitrag unter der Überschrift „Do we need a nuclear steward?“ erscheint nach Review in den Proceedings der Modern2020-Abschlusskonferenz, die im April 2019 in Paris stattfand (Hocke/Kuppler 2019).
- AP4.2: Mit den leitfadengestützten Interviews zu Fragen der Long-term-Governance in den Vergleichsfällen Talsperren, Verkehrsüberwachung und Climate Engineering wurde begonnen. Die Interviewauswertungen werden in einem Workshop im Herbst 2019 (Format vermutlich Fokusgruppen) und im AP5-Bericht zusammenfassend dargestellt. Die Vorbereitungen für die Fokusgruppen (2. Hj. 2019) wurden aufgenommen.
Der Vergleichsfall „Climate Engineering“ (CE) wurde durch die Einladung eines Experten fachlich dargestellt (F. Wittstock, UFZ Leipzig, „Climate Engineering – Perspectives on Governance and Civil Society“, Vortrag am ITAS, 5.6.2019) und durch ein Experteninterview mit dem Referenten ergänzt. Durchgeführt wurde weiterhin ein Experteninterview zum Forschungsstand von Management und Langzeitplanung als Sicherheitskultur. Weitere Interviews befinden sich in Vorbereitung.

Gemeinsame Arbeiten mit allen Projektpartnern:

- Bei der Europäischen Geologenkonferenz in Wien trugen Öko-Institut und ITAS zum Thema „Characteristics of a Participatory, Self-reflecting and Learning Procedure“ vor (Chaudry/Mbah/Brohmann/Hocke 2019).
- Im Mai 2019 wurde der interdisziplinäre Fachworkshop „Robuste Governance in der Endlagerpolitik – Akteure, Prozesse, Entscheidungen“ von allen Projektpartnern gemeinsam durchgeführt. Dort wurden die drei Themenfelder der AP2, 3 und 4 im Hinblick auf die Möglichkeit robuster Entscheidungen in der deutschen Endlagerpolitik vertieft diskutiert (Protokoll liegt vor). Vom ITAS wurde eine Präsentation für das AP4 übernommen. Die darin vorgestellten Thesen zur Langzeit-Governance sowie zur Koordination und Kooperation der Akteure („Endlagersystem ohne Gravitationszentrum“) wurden in einer Arbeitsgruppe weiterentwickelt.
- Eine Moderation zu einer Vorlegung an der FU Berlin im Rahmen des „Offenen Hörsaals“ mit dem Thema „Der Atomkonflikt in Deutschland – bis in alle Ewigkeit?“ wurde übernommen. Die Vorlesung stand unter dem Titel „Gorleben – ein schweres politisches Erbe für die Standortsuche“, Berlin, 29.5.2019.

Es wurden insgesamt zwei Projektgespräche der Verbundpartner durchgeführt (Darmstadt, 11.2.2019; Berlin, 7.5.2019). Dabei entstand der Vorschlag eines interdisziplinär ausgerichteten Sammelbandes, der in einer Reihe des Verlages Springer VS sehr gute Chancen auf Veröffentlichung hat (s. u. AP5).

4. Geplante Weiterarbeiten

AP4: Auswertung der Interviews

- Durchführung des Workshops AP4
- Erarbeitung und Darstellung von Handlungsempfehlungen für die Politik
- Zusammenstellen der Zwischenergebnisse für den Abschlussbericht
- Hocke 2019, „Wer steuert das Verfahren?“, Beitrag für Loccum Protokolle 2019

AP5: Erstellung eines wissenschaftlichen Sammelbandes mit folgenden Beiträgen des ITAS (tlw. in Zusammenarbeit mit weiteren Projektpartnern):

- Brunnengräber/Brohmann/Hocke/Kuppler et al.: Die komplexe Beziehung von Gesellschaft und Technologie in der Endlagersuche. Eine theoretische Annäherung an ein praktisches Problem
- Hocke/Mbah/Seidl: Professionelle „Checks and Balances“ und das Denken in Alternativen. Herausforderungen für ein lernendes Verfahren und Institutionen in einer polarisierten Gesellschaft
- Smeddinck: Förderung von Reversibilität bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle durch Regulierung
- Hocke et al.: Notwendigkeit der Navigation unter Bedingungen von anhaltender Ungewissheit
- Sophie Kuppler et al.: Monitoring und Stewardship. Offene Ideen zur Gestaltung des nächsten Jahrhunderts

Weiterhin Vorbereitung der Abschlusskonferenz im Februar 2020

5. Berichte, Veröffentlichungen

Chaudry, S.; Mbah, M.; Brohmann, B.; Hocke, P. (2019): The German Site Selection Procedure for a Final Repository for High-level Waste – Characteristics of a Participatory, Self-reflecting and Learning Procedure. Vortrag bei der Generalversammlung 2019 der European Geosciences Union. Wien, 8.4.2019.

Hocke, P. (2019a): "Problemorientierte Governance in einem nuklearen Standortauswahlverfahren. Partizipation als Chance für die 'Endlagerung'?" ; Vortrag im Rahmen der Ringvorlesung "Kernenergie und Brennstoffkreislauf", Hannover, 14.1.2019.

Hocke, P. (2019b): „Langzeit-Governance – Warum in die Zukunft denken? Merkmale von Netzwerken zur Sicherung von Entscheidungsqualität und Fehlerkultur“; Vortrag im Rahmen des interdisziplinären SOTEC-radio Workshops „Robuste Governance in der Endlagerpolitik – Akteure, Prozesse, Entscheidungen“, Berlin, 28.5.19.

Hocke, P. (2019c): "Wer steuert das Verfahren? Strukturelle Beobachtungen – konstruktive Handlungsfähigkeit"; Vortrag im Rahmen der Tagung: "Standortsuche: Miteinander – aber nicht konform? Atommüll-Lager und Partizipation", Loccum, 29.6.2019.

Hocke, P.; Brunnengräber, A. (2019): Multi-Level Governance of Nuclear Waste Disposal. Conflicts and Contradictions in the German Decision Making System In: Brunnengräber, A./ Di Nucci, M.R. (Hg.): Conflicts, Participation and Acceptability in Nuclear Waste Governance, Wiesbaden: Springer VS, S. 383–401.

Hocke, P.; Kuppler, S. (2019): “Do We Need a Nuclear Steward? Monitoring Task for a Long-term Governance Institution“. Vortrag und Beitrag in den Proceedings, Modern2020 final conference. Paris, April 2019.

Hocke, P.; Kuppler, S.; Mbah, M. (2019, i.E.): Politischer Lernprozess oder naives Hoffen auf positive Effekte zukünftiger Bürgerbeteiligung? Das neue deutsche Standortauswahlverfahren bei der Entsorgung hochradioaktiver Brennstoffe. In: Lindner, R., et al. (Hg.): Gesellschaftliche Transformationen. Gegenstand oder Aufgabe der Technikfolgenabschätzung. Baden-Baden: edition sigma in Nomos.

Kuppler, S.; Mbah, M. (2019, i.E.): Governing Energy Landscapes – The need for a long-term, place-sensitive perspective (Manuskript eingereicht).

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

AP5: In Kooperation mit dem Netzwerk für Nukleares Gedächtnis erfolgreiche Durchführung der wöchentlich stattfindenden Ringvorlesung „Der Atomkonflikt in Deutschland – bis in alle Ewigkeit?“ (13 Termine) im Rahmen des Offenen Hörsaals an der Freien Universität Berlin (10.04.-10.07.2019).

Gemeinsam mit allen Projektpartnern Durchführung des transdisziplinären Workshops „Robuste Governance in der Endlagerpolitik - Akteure, Prozesse, Entscheidungen“ am 28. Mai 2019 in Berlin. Diskussionsinput des FFU zu dem Themenfeld „Science Policy Interfaces - Institutionen, Wissenschaft und Gesellschaft in komplexen politischen Entscheidungsprozesse“. Vorträge, Diskussionsbeiträge und Inhalte der Arbeitsgruppen wurden dokumentiert und in einem Ergebnisprotokoll zusammengeführt.

AP2.1- 2.2:

- Vortrag zu „Governance in the Anthropocene – how to govern wicked problems?“ Konferenz “Leverage Point 2019”, 6.-8. Februar 2019, Leuphana Universität Lüneburg.
- Vortrag “Soziotechnische Analogien als Erfahrungshintergrund für die Große Transformation - Windkraft, Fracking, Carbon, Capture and Storage (CCS) und ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Vergleich“. DVPW-Sektionstagung “Governance of Big Transformations”, 21.-23. März 2019, TU München.

- Vortrag "Learning from socio-technical analogues for monitoring of DGD - A comparative perspective on wind power, fracking, CCS and deep geological nuclear waste disposal". Modern2020, "2nd International Conference on Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste", 9.-11. April 2019, Paris, Frankreich.
- Teilnahme an der Tagung „Standortsuche: Miteinander – aber nicht konform? Atommüll-Lager und Partizipation“, 28.-30. Juni 2019, Loccum.
- Übertragung des Konzeptes „science policy interfaces“ auf das Themenfeld der Endlagerung. Um die Rolle von Expert*innengremien hinsichtlich ihrer politischen Bedeutung und Einflussmöglichkeiten zu bewerten, wurden verschiedene Endlager-Kommissionen im bundesdeutschen Kontext analysiert (siehe Isidoro Losada et al. 2019).
- Anwendung des Konzeptes der Analoga für die Analyse von sozio-technischen Herausforderungen bei Infrastrukturgroßprojekten und Energietechnologien (siehe Themann/Brunnengräber 2019).
- Übertragung des Konzeptes der Pfadabhängigkeiten auf das Themenfeld der Endlagerung. Eruierung der Interdependenzen zwischen Pfadabhängigkeiten, Auswahl der technologischen Endlageroptionen, Institutionenhandeln und Regulierung (siehe Isidoro Losada 2019; in Erarbeitung).

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2.1: Einreichung des social analogues Textes im Rahmen eines Special Issue im „Journal Utilities Policy“.
- AP2.2: Fertigstellung eines Beitrags über Wissenschafts- und Expertendissense sowie über das Verhältnis von Wissenschafts- und Laienwissen am Beispiel der Zwischenlagerung.
- AP2.3: Fertigstellung eines Beitrags zu der Direktive 2011/70/Euratom und der Analyse der internationalen Wechselwirkungen, die sich aus internationalen Regulierungsmaßnahmen ergeben.
- AP1: Fertigstellung des Arbeitspapiers „Der socio-technical Divide – Zur unterschiedlichen Interpretation und Nutzung von zentralen Begriffen des Endlagerdiskurses“ (Arbeitstitel).
Vortrag, ECPR's General Conference 4.-7-09.2019 in Wroclav, Panel: "Local environmental concerns vs. climate: Increasing societal polarization in energy policy", Paper: "A comparison of major energy infrastructure projects".
- AP5: Erstellung eines Sammelbandes mit verschiedenen thematisch fokussierten Beiträgen vom FFU (z. T. in Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern).

5. Berichte, Veröffentlichungen

- Brunnengräber, A. (2019, 2. überarb. Auflage): Ewigkeitslasten. Die „Endlagerung“ radioaktiver Abfälle als soziales, politisches und wissenschaftliches Projekt, Baden-Baden: edition sigma / Nomos Verlagsgesellschaft / zugleich: Schriftenreihe der Bundeszentrale für politische Bildung, Band 10361, Bonn.
- Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R. (Hrsg.) (2019): Conflicts, Participation and Acceptability in Nuclear Waste Governance (Vol. III), Wiesbaden: Springer VS.
- Brunnengräber, A. (2019): The wicked problem of long term radioactive waste management. Ten characteristics of a complex technical and societal challenge, in: Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R. (Hrsg.) (2019).
- Brunnengräber, A. (2019): Über das Soziotechnische im Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen, in: Müller, Monika C. M. (Hrsg.) (2019): Was es zu bedenken gilt – bei der Vorbereitung der Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland, Reihe Loccumer Protokolle, Rehburg-Loccum 2019.
- Di Nucci, M. R. (2019): Voluntarism in Siting Nuclear Waste Disposal Facilities: Just a Matter of Trust?, in: Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R. (2019).
- Di Nucci, M. R.; Brunnengräber, A. (2019): Making Nuclear Waste Problems Governable, in: Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R. (2019).
- Hocke, P.; Brunnengräber, A. (2019): 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 the Germany, in: Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R. (2019).
- Isidoro Losada, A. M.; Themann, D.; Di Nucci, M. R. (2019): Experts, politics and society in the German site selection process. Ambition and reality of the advisory bodies, in: Brunnengräber, A.; Di Nucci, M.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 vierte Großversuch wurde in Zusammenarbeit mit der GSES mbH vorbereitet. Dazu wurden die benötigten Salzgrusfraktionen durch die GSES mbH bereitgestellt. Ein umfassendes Laborprogramm zur Ermittlung des optimalen Einbauzeitpunktes wurde in Zusammenarbeit zwischen Institut für Bergbau und Spezialtiefbau und Institut für Anorganischer Chemie abgeschlossen. Als Resultat kann festgehalten werden, dass das GESAV-Material spätestens 24 h nach Herstellung verarbeitet (eingebaut) werden muss.
- Die Optimierung des Blasversatzverfahrens wurde im Labormaßstab weiter durchgeführt. Es wurde eine neuartige Benetzungsmethode (Lösung-Salzbinder) entwickelt.
- AP8: Messtechnik aus den ersten beiden Versatzkörpern wurde planmäßig zurückgebaut, um einen vierten Großversuch zu ermöglichen. Kontinuierliche messtechnische Überwachung des dritten Versatzkörpers erfolgt weiterhin. Die Polyhalitbildung wurde in situ in allen drei Versatzkörpern nachgewiesen. Weitere geochemische Analytik wird im 2-Monatsrhythmus fortgesetzt.
- Die Setzungsmessung wird im dritten Versatzkörper (stat.-dyn.) wird fortgesetzt. Die im 1. HJ 2019 ermittelten Messwerte tragen zum Verständnis der Interaktion von Volumenexpansion des Versatzes und Gebirgskonvergenz bei.
- Durchströmungsversuche zur Ermittlung der integralen Permeabilität wurden ausgewertet. Die integrale Permeabilität konnte nicht zweifelsfrei bestimmt werden.
- AP9: Der erste Versatzkörper wurde durch IfG und TUBAF beprobt. Bei der Probegewinnung wurde festgestellt, dass eingebrachte Versatzmaterial sehr standfest ist, sodass regelmäßige Probekörper gewonnen werden konnten.
- Die Untersuchung der Rückstellproben am IfG hat begonnen. Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die im FuE-Vorhaben GESAV I gemachten Aussagen zum Materialverhalten hinsichtlich Einbaudichte, Permeabilität und Festigkeit auch in situ reproduzierbar sind.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP7: Für den vierten Großversuch, welcher im III. Quartal 2019 durchgeführt werden soll ist die Kombination aus stat.-dyn. Einbringen mit anschließendem Verschleudern eines planmäßigen Firstspalts vorgesehen.
- Die neuartige Benetzungsmethode (Labormaßstab) wird dokumentiert.
- AP8: Fortsetzung der messtechnischen Überwachung Versatzkörper III und geochemische Überwachung aller Versatzkörper.
- AP9: Untersuchung der im Rückbau gewonnen Probekörper am Institut für Gebirgsmechanik.
- AP10: Vorbereitung des Abschlussberichts aus labortechnischer Sicht durch Erstellung eines Laborarchivs für die FuE-Vorhaben GESAV I und II.

5. Berichte, Veröffentlichungen

2019 SME Annual Conference & Expo: In-Situ Testing Of A New Backfill Material In Salt Mining – Challenges of the upscaling Process. Vortrag. 27.02.2019, Denver (CO), USA

10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation: In-situ Testing of a new Long-term Stable Backfill Material for HAW-Repositories in Saline Formations. Vortrag. 29.05.2019, Rapid City (SD), USA

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 stattgefunden; eine Telefonkonferenz ist darüber hinaus in Vorbereitung gewesen. Zudem ist das Projekt von der TUC auf dem „US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation“ vorgestellt worden. Neben einer Einführung sind dabei im Vergleich zur Veröffentlichung zum TOUGH-Symposium 2018 verstärkt Simulationsergebnisse und -analysen gezeigt worden (Referenz s.u.). Intern sind zu Modell 1.5 weitere Abstimmungen und Anpassungen erfolgt, Vorlagen ergänzt und weitere analytische Lösungen in diese Vorlagen integriert worden. Ebenfalls sind zum neuen Modell 1.6 gemäß den Besprechungen auf dem Fachtreffen erste Vorschläge vorbereitet worden.

Die Berechnungen zu Modell 1.5 mit dem FTK-Simulator sind kontinuierlich dem Abstimmungsstand angepasst worden. Weitere Simulationsergebnisse der Partner zu den vorangehenden Modellen 1.1 und 1.4 sind bei der TUC eingegangen, und zur Analyse von Diskrepanzen hat sie dabei z.T. weitere Vergleichsberechnungen durchgeführt. Das in Planung befindliche Modell 1.6 soll thermische Prozesse beinhalten. Bei Parameterrecherchen und Vorabberechnungen für dieses Modell ist eine weitere Stelle im FTK-Simulator identifiziert worden, an der Nachbesserungsbedarf besteht.

Behebungen von Unterschieden in den Modell-1.4-Simulationseingaben der Partner infolge der Ergebnisvergleiche und -analysen aus der Vergangenheit haben dazu geführt, dass die Streubreiten in den Ergebnissen zu Modell 1.4 gemindert werden konnten. Bei gleichen Eingaben gelangen die betroffenen Simulatoren in diesen Fällen also zu grundsätzlich übereinstimmenden Simulationsergebnissen, was einen wichtigen Schritt zur Verifikation dieser Simulatoren darstellt. Die Streubreiten sind hierbei nach wie vor etwas größer als in Modell 1.1, was der etwas gestiegenen Komplexität von Modell 1.4 geschuldet sein dürfte.

Erste Dokumentationen zum Projekt sind erfolgt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Festlegung von Parametersets für die Berechnungsvariationen von Modell 1.6 derart, dass sich die entsprechenden Berechnungen möglichst sinnvoll und fehlerfrei durchführen lassen, ist abzuschließen. In diesem Zusammenhang sind Schwachstellen des FTK-Simulators zu beheben, damit schließlich die FTK-Simulationen zu Modell 1.6 durchgeführt und ausgewertet werden können. Noch fehlende Excel-Tabellenkalkulationsvorlagen sind für die Modelle 1.5 und 1.6 zu erstellen. Nach einem gemeinsamen Beschluss der Partner wird mit Modell 1.6 die Stufe 1 des BenVaSim-Projekts beendet sein.

Weitere Dokumentationen der Arbeiten und Ergebnisse der TUC werden erfolgen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Rutenberg, M.; Lux, K.-H.; Feierabend, J.; Maßmann, J.; Lorenzo Sentís, M.; Graupner, B.J.; Hansmann, J.; Czaikowski, O.; Friedenberg, L.; Hotzel, S.; Kock, I.; Rutqvist, J.; Hu, M.; Rinaldi, A.P. (2019): BenVaSim—Introduction to a Benchmarking of TH²M Simulators and First Results. Präsentation und Tagungsband zum 10. „US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation“, SNL/PTKA/BGETEC, 28.-30. Mai 2019, Rapid City, Süddakota, USA
Eine weitere gemeinsame Veröffentlichung ist unter Federführung des Verbundpartners GRS erfolgt (Friedenberg et al., 2019, siehe dort)

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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 beteiligt sich hier mit ihren langjährigen Erfahrungen im Umgang mit dem Simulator CODE_BRIGHT.

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 vom 26.-27. März 2019 bei dem Projektpartner GRS in Köln stattgefunden. Die Projektpartner präsentierten und diskutierten die Ergebnisse zu dem Model 1.4 und zeigten teilweise erste Ergebnisse zu Model 1.5. Es wurden zudem Ansätze für Model 1.6 diskutiert, welches zusätzlich zu Hydraulik und Mechanik auch die grundlegenden thermischen Prozesse in einem Endlagersystem berücksichtigen soll.

Für das Model 1.4 wurden von der GRS nur die Szenarien mit der Berücksichtigung gekoppelter Prozesse bearbeitet, da deren Vernachlässigung dem Simulator CODE_BRIGTH aufgrund seines poromechanischen Ansatzes Schwierigkeiten bereiten. In der Diskussion der Ergebnisse zu Model 1.4 kristallisierten sich Unterschiede des Simulators CODE_BRIGTH zu den weiteren Simulatoren in den Verläufen der Gasdrücke und der Verschiebungen heraus. Diese konnten auf verschiedene Ansätze in der relativen Gaspermeabilität bzw. in den effektiven Spannungen zurückgeführt werden.

Im Laufe des Berichtszeitraum konnte die GRS in Zusammenarbeit mit den Entwicklern von CODE_BRIGTH das Stoffmodel der relativen Gaspermeabilität nach van Genuchten implementieren und eine Lösung für die Verwendung von Bishop Spannungen für ein rein linear elastisches Materialverhalten finden, wodurch eine bessere Vergleichbarkeit der Simulatoren innerhalb des Projekts erreicht wurde. Die neuen Ergebnisse zeigen vor allem in den Verschiebungen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der anderen Projektpartner. Auch die Ergebnisse für die Gasdrücke zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Ausarbeitung des Models 1.6
- Durchführung und Auswertung von Modellberechnungen
- Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse
- Dokumentation

5. Berichte, Veröffentlichungen

Beitrag und Veröffentlichung eines Abstracts im Rahmen des CODE_BRIGTH Workshops 2019

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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 Störungzonennetzwerkes 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 Störungzonennetzwerkes 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, die in Deutschland verfolgte Methodik des geotechnischen Integritätsnachweises am Beispiel des im Projekt URSEL entwickelten Streckenverschlusselements zu beschreiben. In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe analytischer Lösungen eine erste ingenieurtechnische Vorbemessung einzelner Komponenten des Streckenverschlusses (insbesondere Widerlagerelemente) vorgenommen. Anschließend wurde damit begonnen, für die Komponenten des Streckenverschlusses die funktionsbezogenen Einzelnachweise hinsichtlich der strukturellen Integrität nach der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte zu führen. Des Weiteren wurden hydraulische Kennwerte für die drei Teilkomponenten des Bentonit-Dichtelements (Dichtkörper, ALZ, Kontaktzone) ermittelt, als Grundlage für den Dichtheitsnachweis des Verschlusssystems.

AP2: Ziel ist die Prüfung von international entwickelten Gesteinsklassifikationen hinsichtlich ihrer Eignung als Positionierungskriterium für Dichtelemente, Bohrlöcher und Auffahrungen im Kristallin. In einem ersten Schritt wurde das mechanische Kriterium der finnischen Rock Suitability Classification (RSC) untersucht. Das Kriterium untersucht das Schnittverhalten von Klüften mit Einlagerungsbohrlöchern, um mechanische Verwerfungen und eine Beschädigung der Behälter zu vermeiden. In Anlehnung an diese Formulierung wurde in einer ersten Untersuchung das Schnittverhalten eines aus Klüften aufgebauten geologischen Modells (DFN-Modell) mit dem von russischer Seite geplanten Grubengebäude untersucht (Verschneidungen). Eine hohe Anzahl an Verschneidungen ist im Bezug auf das Kluftsystem und seiner charakterisierenden Parameter als ungünstig einzustufen. Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie wurde untersucht, ob bestimmte Kluftparameter (wie Orientierung, Länge etc.) besonders sensitiv auf die Anzahl der Verschneidungen reagieren. Damit ließen sich Kluftsysteme auf Basis von Kluftparametern in für die Positionierung von z.B. Einlagerungsbohrlöchern geeignete und ungeeignete Gebiete klassifizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Kluftdichte und die Form der Kluftlängenverteilung bestimmend für die Anzahl der Verschneidungen sind.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Weiterführung des geotechnischen Integritätsnachweises am Beispiel des im Projekt URSEL entwickelten Streckenverschlusses. Für das Bentonit-Dichtelement sind entsprechende numerische Modellierungen geplant, um den funktionsbezogenen Einzelnachweis der Rissbeschränkung führen zu können. Des Weiteren soll für das gesamte Verschlusssystem ein Dichtheitsnachweis angestrebt werden. Analog zum Streckenverschluss sind für die anderen Elemente des geotechnischen Verschlusssystems hydraulische Kennwerte zu ermitteln.

AP2: Weiterführung der Arbeiten zur Charakterisierung des Schnittverhaltens von Kluftsystemen mit einem Grubengebäude als Grundlage für die Ableitung eines Positionierungskriteriums.

AP5: Für die Erstellung eines strukturgeologischen-hydrogeologischen Modells und die Durchführung von Transportmodellierungen zur Radionuklidausbreitung im Endlagermaßstab, wird ein auf Kontinuumsmodelle fokussierter Ansatz im Projekt SUSE verfolgt. Es ist geplant, die vom Projektpartner GRS bereits durchgeführten Testrechnungen auch seitens BGETEC mit geeigneten Simulationscodes durchzuführen, um einen Vergleich der Ergebnisse herstellen zu können.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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 d³f++ und Re-poTREND 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 28.03.2019, am 15.05.2019 und am 22.05.2019 fanden Projektgespräche bei der BGE Technology mit Beteiligung der BGR und der GRS in Peine statt. Am 30.01.2019 hat die GRS gemeinsam mit der BGE Technology und der BGR am „Round Table - The Use of Underground Space to Solve Nuclear Power Engineering Tasks“ der National University of Science and Technology, College of Mining (NUST – MISIS) und am 31.01.2019 am “Russian-German Meeting on Cooperation in the Field of Radioactive Waste Management“ bei IBRAE RAN teilgenommen. Auf dem Treffen mit IBRAE RAN wurden unter anderem Themenfelder der weiteren Zusammenarbeit definiert.

Am 19. und 20.06.2019 hat eine Delegation des Instituts für Geologie der Erzlagerstätten, Petrographie, Mineralogie und Geochemie (IGEM RAN) der Russischen Akademie der Wissenschaften unter der Leitung von V. Krupskaya die GRS besucht. Auf diesem Treffen wurden vor allem die im Vorhaben durchgeführten und geplanten Laborexperimente diskutiert.

- AP3: Ein einfaches, kleinskaliges Modell (Würfel mit Einzelkluft) wurde erstellt, parametrisiert und erste Testrechnungen wurden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass der Unterschied der Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflussmengen zwischen expliziter Darstellung der Kluft als niederdimensionales Element und der Darstellung der Kluft als Kontinuumsselement größer wird, je stärker die Neigung der Kluft ist.
- AP4: Die Sorptionsexperimente wurden begonnen. Anhand der vorbereitenden Messungen der spezifischen Oberfläche nach BET-Methode wurde festgelegt, dass für die Sorptionsexperimente wegen der begrenzten Materialmengen nur die Fraktion 1-2 mm genutzt werden sollen. Die höhere Temperatur der Sorptionsversuche wurde nicht auf 90 °C, sondern auf 80 °C festgelegt, da die Messung der pH-Werte bei den hohen geplanten Probenzahlen mit den der GRS zur Verfügung stehenden pH-Elektroden nur bis 80°C erfolgen kann. Das synthetische Grundwasser für den Standort Yenisejsky wurde in Abstimmung mit russischen Kollegen definiert und hergestellt. Anschließend wurden die für die Voruntersuchung der Reaktion des Materials mit der Lösung geplanten Batches bei 10 °C und 80 °C mit einer Dauer von 1, 3, 7, 14 und 24 Tagen durchgeführt. Nach der Messung der aus dem Material freigesetzten Cs, Sr, Eu, Si, Fe, Al, K, Na, Mg und Ca sowie der spezifischen Oberflächen der reagierten Proben wird die Dauer der nachfolgenden Sorptionsexperimente festgelegt.
- AP5: Die Modellrechnungen zur regionalen Grundwasserströmung und zum Schadstofftransport wurden anhand eines regionalen Matrixmodells (Equivalent Porous Medium Model, EPM) weiter fortgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse der Modellierung wurden mit denen der russischen Partner verglichen und diskutiert. Die technische Handhabbarkeit regionaler EPM und die Möglichkeit der Modellierung der Grundwasserströmung und des Transports mit d^3f_{++} wurden erfolgreich erprobt. Derzeit sind keine weiteren vergleichenden Rechnungen mit dem Matrixmodell geplant, da die Projektförderung der russischen Projektpartner bereits ausgelaufen ist.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3: Validierung des Ansatzes durch einen Vergleich der Ergebnisse von Modellrechnungen mit den Programmen FLAC3D (BGE Technology) und d^3f_{++} .
- AP4: Die Sorptionsexperimente werden fortgesetzt.
- AP5: Dokumentation der Ergebnisse der Rechnungen mit dem regionalen Matrixmodell.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

Die Arbeiten zu den einzelnen Arbeitspaketen wurden beendet.

AP4: Die mineralogisch/chemische Analyse der Ausbauproben (345 Proben) des HTV-5 wurden abgeschlossen.

Die Versuche zur hydraulischen Steighöhe von ES Materialien wurden fortgesetzt. Die systematische Untersuchung des Quelldruckverhaltens bei unterschiedlicher Trockendichte des Bentonits Secursol UHP wurden abgeschlossen.

Der HTV-6 mit Secursol UHP und Pearson Wasser wurde durchgeführt und rückgebaut. Es wurden Proben zur mineralogisch/chemischen Analyse gewonnen. Im HTV-6 wurde starkes Quellen und Dichtung im DS1 durch die hohe EMDD des eingesetzten Bentonits beobachtet.

Es wurden die MiniSandwichversuche Nr. 9 und 10 mit Secursol UHP und Pearsonwasser fortgesetzt. Für alle durchgeführten MiniSandwich Versuche sank die Fluidpermeabilität von 10^{-14} m² auf 10^{-17} bis 10^{-18} m².

AP5: Die Dimensionierung der Sandwichverschlüsse für beiden Experimentalschächte wurde durchgeführt. Zur Aufsättigung ist eine Druckkammer an der Schachtsohle, die durch ein Schrägbohrloch mit Pearson Wasser Typ A3 gespeist wird, vorgesehen. Ein Back-Up System zum einen durch eine simulierte EDZ (hydraulischer Kurzschluss zwischen ES2 und ES3) sowie eine direkte Flutung des ES3 vom oberen Ende des Schachtes kann eine beschleunigte Aufsättigung ermöglichen. Schacht 2 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. Derzeit sind geänderte Dimensionen sowie eine geänderte Vorsättigung der ES vorgesehen.

AP8: Die Tests mit kabellosen Sensoren zur Feuchtemessung haben ergeben, dass diese noch nicht ausgereift genug sind. Sie werden deshalb bei der Instrumentierung im Sandwich Hauptprojekt zunächst nicht eingeplant.

AP9: Eine detaillierte Projektbeschreibung für das geplante Sandwich-Hauptprojekt einschließlich Zeit- und Kostenplanung wurde bereits im Dezember 2018 fertiggestellt. Im vergangenen Halbjahr wurde ein detaillierter Testplan, der die Installations- und Instrumentierungsarbeiten bei Schacht 1 und im Gebirge umfasst, erstellt.

AP11: 4. Projektmeeting (PM) im März 2019 zum Fortschritt des Projektes sowie insbesondere zur Erstellung des Testplans sowie der Vorbereitung des Schlussberichtes; Der Schlussbericht wurde erstellt und wird derzeit redigiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Fertigstellung des Schlussberichts des Sandwich-Vorprojekts
- Durchführung des geplanten In-situ-Versuchs im Rahmen des Sandwich-Hauptprojekts

5. Berichte, Veröffentlichungen

Boháč, P., Delavernhe, L., Zervas, E., Königer, F., Schuhmann, R., Emmerich, K. (2019): Cation exchange capacity of bentonite in a saline environment. Applied Geochemistry, 100, 407-413

Emmerich et al. (2019): SW-A/B: Preliminary investigations for a Sandwich shaft seal. Mont Terri Technical Meeting TM-36, Porrentruy, February 05-06

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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 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 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

Die Arbeiten zu den einzelnen Arbeitspunkten wurden beendet. Eine detaillierte Projektbeschreibung für das geplante Sandwich-Hauptprojekt einschließlich Zeit- und Kostenplanung wurde bereits im Dezember 2018 fertiggestellt. Im vergangenen Halbjahr wurde ein detaillierter Testplan, der die Installations- und Instrumentierungsarbeiten bei Schacht 1 und im Gebirge umfasst, erstellt, sowie der Abschlussbericht vorbereitet.

Der Testplan sieht vor, dass die Gebirgsinstrumentierung (Umgebung von Schacht 1) und vorlaufende Messungen von August 2019 bis Februar 2020 erfolgen. Ab März 2020 werden die beiden Experimentalschächte (Durchmesser jeweils 1.2 m, Tiefe 12 m und 10 m) in Bohrtechnik erstellt. Anschließend wird in Schacht 1 das Sandwich-Dichtsystem zusammen mit der Schachtinstrumentierung eingebaut. Eine Druckkammer zur Aufsättigung des Verschlusses befindet sich auf der Schachtsohle und wird über ein Schrägbohrloch befüllt. Der Injektionsdruck wird schrittweise bis ca. 3 MPa erhöht. Der Beginn der Aufsättigung ist für Juli 2020 geplant.

Schacht 2 wird zu einem späteren Zeitpunkt (ca. 1 Jahr nach Inbetriebnahme Schacht 1) mit einem modifizierten Dichtsystem (geänderte Dimensionen und Anfangssättigung) versehen, wobei Erfahrungen aus dem Betrieb von Schacht 1 eingehen.

Die dreidimensionalen Auslegungsrechnungen wurden um die Modellierung der Aufsättigungsphase nach Verschlusseinbringung erweitert. Diese zeigen, dass die hohe Saugspannung der Dichtsegmente aus Bentonit zunächst zu einer Teilentsättigung des Schachtnahbereichs führt. Die Aufsättigung des Dichtsystems erfolgt erwartungsgemäß sehr langsam, wobei kaum ein Unterschied in der Aufsättigungsgeschwindigkeit von unten (von der Druckkammer) und von der Schachtwand bzw. der Auflockerungszone her zu bestehen scheint. Die Aufsättigung wird also von den Eigenschaften des Bentonits und nicht vom anliegenden Injektionsdruck gesteuert. Für längere Zeiten wurden die gekoppelten Simulationen aus Stabilitätsgründen durch rein hydraulische Simulationen ergänzt. Diese prognostizieren ca. 5 Jahre nach Aufsättigungsbeginn eine Sättigung der Dichtsegmente von 80 – 90 %, abhängig von den Eigenschaften der Auflockerungszone. Allerdings vernachlässigen die hydraulischen Simulationen die Bentonitquellung und die damit einhergehenden Änderungen der hydraulischen Eigenschaften, so dass tatsächlich von einer langsameren Aufsättigung auszugehen ist. Weitere gekoppelte Modellrechnungen sind parallel zum In-situ-Versuch geplant.

Um bei den zu erwartenden langen Aufsättigungszeiten zu vermeiden, dass aussagekräftige Ergebnisse erst zu sehr späten Zeiten anfallen, wird Schacht 1 mit einem System versehen, das es ermöglicht, ein Äquipotentialsegment gezielt zu fluten und damit die Aufsättigung der benachbarten Dichtsegmente zu beschleunigen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Fertigstellung des Abschlussberichts des Sandwich-Vorprojekts
- Durchführung des geplanten In-situ-Versuchs im Rahmen des Sandwich-Hauptprojekts

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 von photometrischen Messungen an Selenid-Lösungen wurden bei einer geplanten Öffnung der Glove Box entsprechende Vorbereitungen getroffen und Einbauten in die Glove Box vorgenommen.

Bei der isothermen Titrationskalorimetrie wurde die Verdünnungsenthalpie von NaCl-Lösung von 6,0 – 2,0 mol/kg in drei Experimenten wiederholt gemessen. Die experimentellen Werte stimmen gut mit den für das System berechneten Verdünnungsenthalpien überein. Ebenso wurde die Verdünnungsenthalpie von CsSO₄-Lösung von 4,7 bis 1,34 mol/kg in drei Experimenten gemessen. Da bei den Messungen jedoch plötzlich zusätzliche exotherme Peaks auftraten, konnten die Enthalpien der einzelnen Titrationsschritte leider nicht mehr genau bestimmt werden. Bis zum Ende des Berichtszeitraums wurde versucht, das Problem an der Kalorimetrie durch Austausch und Erneuerung von Systemkomponenten sowie einer kleineren selbst durchgeführten Wartung zu beheben.

Durch einen Vergleich von Verdünnungsexperimenten von Salzlösungen unter Verwendung des Gold- sowie des selbst angefertigten PEEK-Rührers konnte festgestellt werden, dass sich die Messwerte nur um bis zu 5 % unterscheiden, was in etwa der Abweichung bei Wiederholung eines Experimentes entspricht.

Die Isopiestik wurde fortgeführt. Für ternäre Lösungen von Cäsiumchlorid mit CaCl₂ wurde bei Temperaturen > 25 °C eine Isoaktivitätslinie erstellt, die isopiestischen Messungen von Cäsiumsulfat mit Na₂SO₄, K₂SO₄ und Cs₂SO₄ bei T > 25 °C wurden begonnen.

AP5: Fertigstellung eines generischen Posters und des Webauftritts für VESPA II.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Das Messsystem für oxidationsempfindlichen Selenide mittels photometrischer Titration wird aufgebaut und die Messungen begonnen.

An der isothermen Kalorimetrie werden der Vergleich Gold-Rührer versus Teflon-Rührer wiederholt sowie die Messungen für CsSO₄-Lösungen wiederholt und quantifiziert. Danach wird eine iodfreie MgI₂-Stammlösung hergestellt und charakterisiert. Anschließend wird die Verdünnungsenthalpie von MgI₂ und K₂SeO₃ für 25 °C sowie für MgI₂ auch für höhere Temperaturen bestimmt.

Für ternäre Lösungen von Cäsiumchlorid mit CaCl₂ wird bei Temperaturen > 25 °C eine zweite Isoaktivitätslinie erstellt und die isopiestischen Messungen von Cäsiumchlorid mit Na₂SO₄, K₂SO₄, MgSO₄ und Cs₂SO₄ bei T > 25 °C werden abgeschlossen. Anschließend wird für das System Cs-(Na/K/Mg/Ca)-Cl/SO₄-H₂O ein Aktivitätsmodell für Temperaturen von 0-90 °C erstellt.

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

AP5: Präsentation der Arbeiten zu VESPA II bei der Goldschmidt Konferenz.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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:

- Es wurde eine quantitative Rückhaltung von Tc an reinem Pyrit für $\text{pH} > 5.5$ bereits nach 1 Tag gezeigt, für $\text{pH} < 5.5$ ist hierfür 1 Monat nötig. Ionenstärke-Effekte wurden nicht beobachtet. Die Unterschiede können durch die Auflösungskinetik des Pyrit erklärt werden.
- Mittels SEM und Raman wurden Änderungen der Oberflächen-Morphology und die Bildung der Sekundärphasen Hämatit und Magnetit nachgewiesen. XAS ergab Tc(IV) als wesentlichen Oxidationszustand und die Bindung des Tc an Sauerstoff. Bei $\text{pH} 6$ wurden Tc(IV)-Dimere sorbiert an Hämatit und bei $\text{pH} 10$ Tc(IV) eingebaut in Magnetit gefunden. XPS zeigte zudem die Bildung von TcS_2 .
- Selbst zwei Monate an der Atmosphäre blieb Tc(IV) bei $\text{pH} 6$ & 10 stabil.
- Die Rückhaltung von Tc an $\text{Fe}^{\text{II}}\text{-Al}^{\text{III}}\text{-Cl}$ LDH-Phasen bei $\text{pH} 4.5, 6.5$ and 9.5 untersucht. Raman-Mikroskopie zeigte nach Reduktion of Tc(VII) die Bildung von Hämatite und Goethit. Tc(IV) wurde über XAS nachgewiesen, dabei sind die gebildeten Spezies je nach pH unterschiedlich.
- In situ Attenuated Total Reflexion Fourier Transformed Infrared an $\text{Fe}^{\text{II}}\text{-Al}^{\text{III}}\text{-Cl}$ LDH-Phasen in Kontakt mit Tc zeigten bei $\text{pH} 4.5$ einen kleinen Beitrag von Tc(VII) Anionenaustausch mit dem Cl^- der LDH-Phasen.

AP2:

- Die elektrochemische Zelle ist einsatzbereit und hat erfolgreich Testläufe absolviert und ist nun fester Bestandteil des Forschungsprogramms.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

- Optimierung der Synthese von Markasit Bei Erfolg Charakterisierung der Rückhaltung von Tc an reinem Markasit.
- Untersuchung der Rückhaltung von Tc an Al_2O_3 in Gegenwart von S^{2-} und Sn^{2+} .
- Synthese, Charakterisierung und Tc-Rückhaltung an $\text{Fe}^{\text{II}}\text{-Fe}^{\text{III}}\text{-Cl}$ Grünrost Phasen.
- Einreichung von drei Publikationen zur Rückhaltung von Tc an: 1) Pyrit, 2) Alumina mit und ohne sorbiertem Fe(II) und 3) $\text{Fe}^{\text{II}}\text{-Al}^{\text{III}}\text{-Cl}$ LDH.

AP2:

- Erste spektro-elektrochemische Experimente zur Untersuchung der Reduktion von Tc(VII) zu Tc(IV) in wässriger Lösung (NaCl , NaClO_4 , NaHCO_3 , NaNO_3 and Na_2SO_4).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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) Auswertung der Tc(IV)-Löslichkeitsexperimente in verdünnten bis konzentrierten NaCl-Na₂SO₄, sowie konzentrierten MgCl₂-MgSO₄ und CaCl₂-MgSO₄ Lösungen. (ii) Vorläufige thermodynamische Analyse der Tc(IV)-SO₄ Systeme. (iii) Experimentplanung für Löslichkeitsstudien im Tc-Gluconat System aus der Unter- und Übersätti-

gung. (iv) Entwicklung moderner XAS-Methoden zur Analyse der Tc-Speziation komplexer Systeme (z.B. Gluconat).

AP2: (i) Modellrechnungen und Fortführung der Langzeit-Rekristallisationsexperimente.

AP3: (i) Fertigstellung von Grüner Rost-Mischphasen zwischen reinen Chlorid- und Iodid-Endgliedern („Einbau“). Analysen mittels mikroskopischer und spektroskopischer Methoden, Beginn der XAS Datenauswertung. (ii) Sorptionsversuche zur Wechselwirkung („Adsorption“) zwischen Iodid und Grüner Rost-Phasen wurden durchgeführt. Ergebnisse zeigen einen leichten Einfluss der Ionenstärke und des pH auf die Rückhaltung (Abnahme mit Ionenstärke, Zunahme mit pH).

AP4: (i) Weitere Gas- und Lösungsprobenahmen des Auslaugexperiments mit bestrahltem Kernbrennstoff zur Bestimmung der ^{129}I -Freisetzung (IRF). (ii) Erste Ergebnisse zur ^{129}I Freisetzung aus dem Auslaugexperiment mit bestrahltem Kernbrennstoff wurden erhalten. (iii) Tests der Methode zur Separation von ^{129}I von anderen Radionukliden in alkalischen Lösungen welche in Kontakt mit Kernbrennstoff/Zircaloy waren, ergaben einen Wiedererhalt von über 90 % für ^{129}I .

AP5 und AP6: Es wurden keine Arbeiten im Berichtszeitraum durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

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

AP1: (i) Abschluss der thermodynamischen Analyse der Tc(IV)-SO₄ Systeme. (ii) Löslichkeitsexperimente aus der Unter- und Übersättigung mit Tc bei Anwesenheit von Gluconat; (iii) Anwendung moderner XAS-Analysemethoden zur Charakterisierung der Speziation von Tc bei Anwesenheit von Sulfat oder Gluconat. (iv) Ansetzen von Experimenten mit Re für Analogiebetrachtungen zu den untersuchten Tc-Systemen.

AP2: (i) Monitoring der Rekristallisationsexperimente: XRD, SEM-EDX und ggf. TEM. (ii) Analytische Untersuchungen der rekristallisierten Partikel (TEM in coop. mit FZJ).

AP3: (i) Fortsetzung der XAS-Datenauswertung („Einbau“). Die Ergebnisse sollen in einen Konferenzbeitrag eingebracht werden, ein Manuskript ist ebenfalls in Vorbereitung. (ii) Fortsetzung der exp. Untersuchungen und Modellierung der Sorptionsdaten von Iodid an Grünem Rost. (iii) Fortsetzung und Optimierung der Alterationsexperimente mit Grünem Rost.

AP4: (i) Weitere Beprobung des Auslaugexperimentes zum Freisetzungsverhalten von ^{129}I . (ii) Anwendung der Separationsmethode für ^{129}I auf Proben des Auslaugexperiments mit bestrahltem Kernbrennstoff.

AP5 und AP6: Es sind keine Arbeiten im kommenden Berichtszeitraum geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

S. Duckworth et al.: Posterpräsentation beim internationalen ABC-Salt Workshop, 25.+26.6.2019, in Karlsruhe, Deutschland

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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 -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

- AP2: Im Berichtszeitraum erfolgte eine Charakterisierung von durch Anionenaustausch hergestellten (Mg,Ni)Al-LDH-I Phasen mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS), wobei die Messungen an der „Test Facility and Synchrotron Radiation Source“ (ANKA) am KIT durchgeführt wurden. Dabei wurde XANES and EXAFS Spektren vom Ni K-Rand ($E = 8,333$ eV) und I L3-Rand ($E = 4,557$ eV) im Transmissionsmodus aufgenommen, um Informationen zur Koordination von Ni und I und deren Speziation zu erhalten. Die Datenauswertung wird demächst abgeschlossen. Zudem wurde die Reversibilität des Iodideinbau in die (Mg,Ni)Al-LDH Phasen in Desorptionsexperimenten untersucht. Dabei wurde eine Abhängigkeit der Freisetzung von Iodid von der Chloridkonzentration in der Lösung beobachtet.
- AP3: Die durchgeführten Kopräzipitationsexperimente weisen auf eine geringe Effizienz bzgl. des Iodid-Einbaus in (Mg,Ni)Al-LDH hin. Die hergestellten LDH-I Phasen weisen auch nach einem Jahr Alterung nur eine geringe Kristallinität auf, im Unterschied zu durch Kopräzipitation hergestellten analogen LDH-Cl Phasen, die in Röntgendiffraktogrammen die typische Schichtstruktur der Doppelhydroxid-Verbindungen zeigen.
- AP4: Des Weiteren wurden auch durch Rekonstruktion hergestellt Iod-haltigen LDH-Phasen, mittels XAS untersucht. Strukturuntersuchungen mittels XRD deuten darauf hin, dass die LDH-Struktur sich bei Kontakt mit Iodid-haltigen wässrigen Lösungen wieder neubildet und dabei Iodid einbaut. Reversibilitätsuntersuchungen an diesen Phasen zeigten eine deutlich höhere Stabilität des Iodideinbaus im Vergleich zu durch Anionenaustausch hergestellten LDH-I Phasen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im nächsten Halbjahr soll die Auswertung der XAS-Daten abgeschlossen werden. Außerdem ist die strukturelle Charakterisierung der in AP2 bis AP4 mittels verschiedener Verfahren hergestellten Iodid-haltigen LDH-Phasen mittels IR- und RAMAN-Spektroskopie vorgesehen, um den Einfluss des Ni auf den Einbau von Iodid und die Iodid-Rückhaltung in LDH zu verstehen. Zudem sind chemische Untersuchungen an den Lösungen, die im Gleichgewicht mit verschiedenen LDH-I Phasen sind, geplant, um die für die thermodynamische Modellierung von LDH-I Phasen benötigten Basisdaten zur erzeugen.

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 (CHRISTA 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 wurde dahingehend erweitert, dass neben dem Sicherheitskonzept auch erste Aspekte des Nachweiskonzeptes beschrieben wurden.

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“ abgeschlossen und in einem Bericht dokumentiert. Mit der Erstellung des FEP-Kataloges für den „überlagernden ewG“ wurde begonnen.

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. Im Berichtszeitraum wurden für alle bestehenden Kriterien Quantifizierungen im Entwurf angegeben. Dies gilt zunächst für das Wirtsgestein bzw. die Optionen „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“. Begonnen wurde damit, die Kriterien analog auch für das geotechnische Barrierensystem für beide Optionen zu quantifizieren, so dass auch für dieses Barrierensystem rechnerische Nachweise geführt werden können.

Ebenfalls mit Bezug zum Arbeitspaket 4 wurde das Verfüll- und Verschlusskonzept für die Option „multipler ewG“ weiterentwickelt. Dies betrifft insbesondere die Einlagerungsbohrlöcher und deren Verschlüsse. Zum einen wurde die Behälteranzahl pro Bohrloch von 1 auf 3 erhöht und zum anderen der Bohrlochverschluss hinsichtlich des Abstandes zu den Behältern und hinsichtlich des Widerlagers verändert. Für die Option „überlagernder ewG“ wurde ein erster Entwurf für einen Schachtverschluss auf Basis des von BGR gelieferten lithologischen Profils der Barriereformation erstellt. Schacht- oder Rampenverschlüsse stellen in dieser Option die wesentlichen geotechnischen Barrieren dar, da diese Tageszugänge den „überlagernden ewG“ durchhörtern.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Weiterführung der Arbeiten zur Beschreibung des Nachweiskonzeptes
- Weiterführung der Arbeiten zum FEP-Katalog „überlagernder ewG“
- Dokumentation der entwickelten FEP zum „überlagernden ewG“ in Katalogform
- Fortführung der Arbeiten zur Quantifizierung der Integritätskriterien.
- Prüfung und ggf. weitere Anpassung der Verschlusskonzepte zum „multiplen ewG“ und „überlagernden ewG“ als Folge von laufenden Prozessanalysen.
- Entwicklung von Verfüll- und Verschlusskonzepten für die 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 (CHRISTA 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 749.940,00 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

Die GRS ist an den Arbeiten in AP1, AP3, AP4 und AP5 beteiligt. Die Arbeiten in AP1 sind abgeschlossen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP3: Vorbereitung mehrerer FEP für gemeinsame Besprechungen mit BGETEC und BGR am 12.2., 29.4., 21.5. und 25.6.2019 zur Erstellung eines FEP-Kataloges für die ewG-Konfiguration „überdeckender ewG“ (Typ B gemäß AkEnd).
- AP4: Es wurde eine Literaturstudie gestartet, um die Verfügbarkeit, Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Sorbenzien, wie Ag-imprägnierten amorphen Quarz, zur Rückhaltung von anionischen und gasförmigen Radionukliden, z. B. I-129, einzuschätzen zu können sowie eingehende Laboruntersuchungen auszuarbeiten.
Für das UTL Bukov wurden von SURAO Laserscandaten der Hohlräume übermittelt, die derzeit in VIRTUS eingearbeitet werden.
- AP5: Nachweisführung am Rande des ewG für die ewG-Konfigurationen Typ „multipler ewG“. Berechnung von Sicherheitsindikatoren mit Hilfe des im Vorhaben entwickelten Moduls Combiner. Erstellung eines Rechenfalls zum Benchmark für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Kristallingestein mit UJV und SURAO.

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.
- AP4: Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche soll ein In-situ-Versuch für das UTL Bukov vorgeschlagen werden. Die Hohlraumdaten sollen in VIRTUS mit dem geologischen Modell verschnitten werden und auf dem gemeinsamen Workshop mit SURAO und UJV im November vorgestellt werden.
- AP5: Weiterführung der Arbeiten zur Nachweisführung am Rande des ewG für die ewG-Konfigurationen Typ „überdeckender ewG“. Berechnung von Sicherheitsindikatoren für diese Konfiguration. Umsetzung des von der BGR entwickelten geologischen Modell für diese Konfiguration in das Grundwasserströmungs- und Transportmodell d³f⁺⁺.
Vorstellung der Ergebnisse von RepoTREND zum Benchmark für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Kristallingestein auf dem gemeinsamen Workshop mit UJV und SURAO im November.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 Ausbruchsmaterial aus dem Opalinuston (ist dem in einem deutschen Endlager zu erwartenden Wirtsgestein am ähnlichsten - Standortmodell SÜD) und des Gemisches mit Bentonitzusatz experimentell zu bestimmen und die Eignung als Versatz- und Verschlussmaterialien zu analysieren. Dadurch soll ein verbessertes Verständnis für das Materialverhalten erreicht und eine Grundlage für eine belastbare Prognose der Langzeitprozesse im Versatz- und Verschlussystem mit Blick auf die langfristige Abdichtung eines Endlagers in einer Tonsteinformation geschaffen werden. Damit leistet das Projekt einen Beitrag zur Absicherung der Grundlagen für die Langzeitsicherheitsanalyse von HAW-Endlagern in Deutschland.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

- AP1: Ermittlung der geotechnischen Eigenschaften wie z. B. Kompaktion und Permeabilität des Ausbruchmaterials zur langfristigen Abdichtung der Endlagerhöhlräume
- 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

- Die Messungen der Wasseraufnahmefähigkeit von Bentonit MX80 sind an 50 Proben bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten von 30-100 % durchgeführt worden. Die Proben wurden vorher bei hohen Temperaturen von 25, 50, 100, 150 und 200 °C getrocknet, um die In-Situ-Bedingungen des Buffers um HAW zu simulieren. Damit lässt sich die Wasseraufnahmefähigkeit des Bentonits in Abhängigkeit von Trocknungstemperatur ermitteln. Die Versuche werden in der nächsten Zeit ausgewertet.
- Die Messungen von Quelldruck, Wasserpermeabilität und Gasperrdruck von kompaktiertem Bentonit und Bentonit-Tonstein-Gemisch sind in 10 Oedometerzellen mit jeweiligen fünf Proben im Lauf. Zur Simulation der In-Situ-Bedingungen des HAW-Buffers wurden die Bentonitproben mit einer Trockendichte von 1.5 g/cm³ und Tonstein-Bentonit-Gemischproben (70/30) mit einer Trockendichte von 2.0 g/cm³ wurden vorher bei hohen Temperaturen von 25, 50, 100, 150 und 200 °C getrocknet. Die Hauptzielsetzung liegt darin, Temperatureinflüsse auf diese wichtigen Eigenschaften der Buffermaterialien zu ermitteln.
- Zur Untersuchung der Eignung des Ausbruchtonsteins als Streckenversatz wurde eine große Oedometerzelle mit einem Durchmesser von 280 mm und einer Höhe von 250 mm gestartet. Das Ausbruchsmaterial mit Grobkörnern bis zu 30 mm Durchmesser werden stufenweise kompaktiert. Dabei werden die kompaktierte Porosität und Wasserpermeabilität des Materials im Zusammenhang mit der mechanischen Belastung bestimmt.
- Eine Reihe von Oedometerversuchen zur Eignungsprüfung von vier unterschiedlichen Verschlussmaterialien sind seit ca. einem Jahr im Lauf: (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 wurden in Oedometerzellen (D=120mm, H=50-80 mm) eingebaut, mit Opalinustonwasser geflutet und stufenweise verdichtet, um die Kompaktion und Wasserpermeabilität bei erhöhten Spannungen zu bestimmen.
- Teilnahme und Vortrag bei the European Geosciences Union General Assembly 2019 in Vienna, 7.-12. April 2019.
- Teilnahme am Workshop in Beijing zur Diskussion and Beratung der Planung des chinesischen Untertagelabours (URL) Beishan in Granite und des zugehörigen FuE-Programms, 20.-23. Mai 2019.

4. Geplante Weiterarbeiten

Folgende Versuche werden im nächsten Halbjahr gestartet und durchgeführt:

- Starten der Messungen von thermischer Leitfähigkeit der untersuchten Materialien
- Fortführung der laufenden Langzeitversuche (Wasseraufnahme, Quelldruck, Kompaktion, Permeabilität, Gasperrdruck, ...)

5. Berichte, Veröffentlichungen

Zhang CL: Presentation of the GRS' investigation on self-sealing of fractures in clay rock, at the European Geosciences Union General Assembly 2019 in Vienna, 7–12 April 2019

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 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-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

Die im ersten Halbjahr 2019 durchgeführten Arbeiten konzentrierten sich auf den Aufbau eines in sich konsistenten strukturgeologischen Modells für Deutschland, das sich von der Erdoberfläche bis in die Mantellithosphäre erstreckt. Zunächst wurde als zentraler Teil des späteren Gesamtmodells ein auf gravimetrischen Daten basierendes Untergrundmodell von Deutschland aufbereitet. Dieses Modell „3DD“ (3D Deutschland) wurde freundlicherweise von der Sektion 4.5 Sedimentbeckenmodellierung am GFZ Potsdam zur Verfügung gestellt. Das 3DD ist aus drei Einzelmodellen zusammengesetzt, die das Zentraleuropäische Beckensystem, SE Deutschland mit Fokus auf dem Molassebecken sowie SW Deutschland mit Schwerpunkt auf dem Oberrheingraben umfassen. In dem kombinierten 3DD-Modell sind die Horizonte in der oberen Kruste - unabhängig von ihrer tatsächlichen Verbreitung – als durchgehende Flächen im gesamten Modellgebiet definiert. In Regionen, in denen diese Lithologien in Wirklichkeit nicht auftreten, sind diese dann im Modell als stark ausgedünnte Schichten ausgehalten. Hauptaufgabe für die Nutzung von 3DD für das SpannEnD-Projekt war es daher, diese Modellhorizonte so anzupassen, dass sie der wahren Verbreitung entsprechen. Als weiteres Problem trat auf, dass die Grenze des Grundgebirges in den einzelnen Teilmodellen jeweils unterschiedlich definiert ist und nicht in allen Fällen dem Top Kristallin entspricht. Da Top Kristallin eine wichtige geomechanische Grenze darstellt, wurde diese anhand von Literaturdaten nachträglich in das Modell integriert. Neben dem 3DD wurden ein weiteres Untergrundmodell des Erzgebirges und angrenzender Gebieten, das freundlicherweise von Uwe Kroner (TU Bergakademie Freiberg) zur Verfügung gestellt wurde, sowie weitere, bereits publizierte Datensätze zur Krusten- und Lithosphärenstruktur von Zentraleuropa in das SpannEnD-Strukturmodell integriert. Damit steht für die Arbeiten bereits jetzt das umfassendste bislang erstellte Untergrundmodell von Deutschland zur Verfügung.

Dieses Modell soll außer den lithostratigraphischen Horizonten auch Störungen enthalten. Neben der Aufbereitung des 3DD wurde daher im Zuge der fortlaufenden Literaturrecherche eine Übersicht aller bedeutenden Störungen in Deutschland und den angrenzenden Staaten erstellt, die als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der für die Modellierung relevanten Störungen dient. Als Entscheidungskriterien wurden insbesondere Informationen über die Störungslänge, den vertikalen und horizontalen Störungsversatz und die tektonische Aktivität zusammengetragen. Für die Konstruktion der Geometrien der Störungen wurden zahlreiche geologisch interpretierte Profilschnitte, hauptsächlich aus seismischen Studien, in das Modell integriert. Mit Hilfe dieser Profilschnitte konnten auch verbliebene Lücken innerhalb des strukturgeologischen Modells geschlossen werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im zweiten Halbjahr 2019 werden folgende Arbeitsschwerpunkte adressiert:

- Auswahl der relevanten Störungen, die im 3-D-Modell berücksichtigt werden sollen,
- Fertigstellung des in sich konsistenten strukturgeologischen Modells aus allen bisher gesammelten Daten,
- Transfer der Modellgeometrie und Erstellung des Rechengitters für die Finiten Elemente Modellierung,
- Beginn der Kalibrierung des FE Modells.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Für die GeoMünster 2019 im September 2019 wurde eine Posterpräsentation eingereicht:

Ahlers, S.; Röckel, L., Henk, A., Reiter, K., Hergert, T., Müller, B., Schilling, F., Heidbach, O., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., Anikiev, D., 2019: SpannEnD – Modelling the 3D stress state of Germany, GeoMünster 2019, 22-25 September 2019, Münster, 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

Frau Morawietz hat die Kompilation der Spannungsmagnitudendaten Deutschlands und angrenzenden Gebiete abgeschlossen und die erste Rohfassung für eine Publikation zu der Datenbank für ein internationales Journal abgeschlossen. Diese Version befindet sich derzeit im internen Review bei den Ko-Autoren und internationalen Fachleuten, um insbesondere das vorgeschlagene „*Quality Ranking Scheme*“ zunächst intern zu begutachten.

Das Herzstück der Arbeiten war die Ableitung eines „*Quality Ranking Scheme*“ mit dem die Daten vergleichend dargestellt werden können. Insbesondere wird bei der Publikation auch die Abgrenzung der Daten aus dem World Stress Map Projekt gezeigt, die sich auf die Kompilation von Daten zur Orientierung des Spannungstensors und des Spannungsregimes in der Erdkruste fokussiert. Von ebenfalls zentraler Bedeutung ist, dass die Spannungsmagnituden-Daten, die in der finalen Datenbank bereitgestellt werden, öffentlich zugänglich gemacht werden dürfen. Alle präsentierten Daten haben daher eine Datenfreigabe und sind mit Berichten und Publikationen hinterlegt. Weitere Datensätze insbesondere aus der bayerischen Molasse liegen uns ebenfalls vor, bzw. sind uns zur Freigabe in Aussicht gestellt worden. Diese weiteren 60-70 Datensätze und weitere können jederzeit hinzugefügt werden.

Die Daten-Qualitäten sind für das komplementäre Teilprojekt A des KIT und der TU Darmstadt von zentraler Bedeutung, da die geom.-num. Modelle, die in diesem Teilprojekt entwickelt wird, mit den vorliegenden Spannungs-Magnitudendaten gewichtet kalibriert werden sollen. Inwiefern wir hierfür auch die nicht-öffentlich zugänglichen Daten verwenden werden, wird in dem nächsten Projektmeeting im Herbst 2019 diskutiert werden. Momentan sind die Daten in einer einfachen Matlab Datenbank zusammengefasst bzw. werden als ASCII File mit Dokumentation bereitgestellt. Langfristiges Ziel ist es die Daten in die neue Datenbankstruktur des World Stress Map Projektes mit der Software postgresQL zu überführen. Hiermit wird ein langfristiger und nachhaltiger öffentlicher Zugang zu den Daten gesichert und eine laufende Aktualisierung, wenn neue Daten hinzugefügt werden, möglich. Die aktuelle WSM Datenbank wird derzeit sowohl technisch (neue Datenbankstruktur) als auch inhaltlich (Hinzunahme der Spannungsmagnitudendaten) in Zusammenarbeit mit Frau Steffi Lammers (GIS Spezialistin Arbeitsgruppe Heidbach am GFZ Potsdam) weiter entwickelt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Für das zweite Halbjahr 2019 werden folgende Arbeitsschwerpunkte adressiert:

- Abschluss der Datenkompilation inkl. Erfassung der Quellen in einer Literaturdatenbank und Bereitstellung durch den GFZ Data Service inkl. der Vergabe einer DOI
- Publikation eines Papers mit der Beschreibung der Spannungsmagnituden-Datenbank in einem Open Access Journal inkl. eines digitalen Anhangs aller Datensätze mit Kommentar.
- Präsentation der Ergebnisse auf der Tagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Münster im September 2019. Hier ist ein Schwerpunktthema die Endlagerforschung.
- Start der generischen geomechanisch-numerischen Modelle zum „upscaling“ von der Bohrlochdimension über das Nahfeld (10-100 Meter) in das Fernfeld (Kilometer-Skala).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Morawietz, S., Heidbach, O., Müller, B., Reiter, K., Röckel, Th. (2019): Es bleibt SpannEnD, 79. Jahrestagung der DGG, 4.-7. März 2019, Braunschweig, Germany

Für die GeoMünster 2019 wurde folgende Posterpräsentation eingereicht:

Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K., Ziegler, M.O. (2019): Would you like stress? GeoMünster 2019, 22.-25. September 2019, Münster, Germany

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

AP1.2 Aufgabe: Aufbau Modellgeometrie und Parametrisierung

Aufbau Modellgeometrie und Parametrisierung:

- Für fehlende Bereiche im Südosten und Südwesten des Modells wurden der Verlauf der Grenze Grundgebirge/Deckgebirge und der Mohorovičić-Diskontinuität recherchiert (KIT und TUDA) und dem modifizierten Ursprungsmodell angefügt (TUDA). Im Bereich Frankreich

wurden Karten mit der Grenze zwischen Grund- und Deckgebirge abdigitalisiert und in GoCAD überführt, um ein Zusammenführen mit dem Ursprungsmodell zu ermöglichen.

- Es erfolgt eine erste Einarbeitung in die Software ApplePy, um zu prüfen, ob diese zur Parametrisierung des Modells genutzt werden kann.

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. Diese Störungen könnten z.B. durch technische Aktivitäten (Spannungs- und Porendruckänderungen) reaktiviert werden. Aus diesen Störungen wurden diejenigen selektiert, die als strukturell am einflussreichsten erachtet wurden. Die Selektion der Störungen im Süddeutschen Raum erfolgte am KIT, die Selektion der Störungen im Norddeutschen Raum an der TUDA. Zusätzlich wurden weitere Störungen aufgenommen, die im Katalog nicht hinterlegt sind, aber ebenfalls einen großen strukturellen Einfluss besitzen. Beispielfhaft können hier die Badenweiler-Lenzkirchzone und die Albtal-Scherzone genannt werden. Es wurden zudem nach Möglichkeit die Geometrien der Störungen in der Tiefe recherchiert (Tiefe des Abscherhorizonts, Richtung des Fallens etc.) um die Störungen im 3D Modell darzustellen. Hierzu wurden unter anderem seismische Profile, weitere Modelle und Beschreibungen aus der Literatur genutzt. Nicht für alle Störungen konnten alle Informationen zusammengetragen werden, in diesen Fällen wurden Annahmen beispielsweise bezüglich der Tiefe des Abscherhorizonts oder des Einfallens getroffen. Insgesamt werden nach Ende der Implementierung 25 – 30 Störungen in einem 3D Datensatz zur Verfügung stehen.

Publikationen:

- Zur Konferenz GeoMünster2019 wurden drei Poster für das SpannEnD Projekt angemeldet. Neben einem Poster, welches das Projekt im Allgemeinen vorstellen soll und einem Poster zur Magnitudendatenbank soll ein Poster zum Modell vorgestellt werden.
- Es wurde ein Abstract für die SPE Student Technical Conference in Aachen eingereicht, wo das Projekt und das Modell am 14.11 und 15.11 2015 vorgestellt werden sollen.

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 „gemesht“ 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 an.
- Vertiefte Einarbeitung in die Software ApplePy. Überprüfung der Anwendbarkeit von ApplePy zur Parametrisierung durch einen Vergleich herkömmlich gemeshter und parametrisierter Modelle mit Modellen, die mit der ApplyPy-Methode parametrisiert wurden.
- Erste generische Modelle zum Spannungstransfer über Randstörungen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.410.535,00 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 RWMC Sitzung in Paris. Mitarbeit bei der Erstellung des neuen Programme of Work (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". Mitarbeit bei der Vorbereitung eines IDKM-Arbeitspakets zum Thema Archivierung.
- Teilnahme an der Sitzung des AK Szenarienentwicklung mit Vorträgen zur Behandlung der Biosphäre und Auswirkungen durch klimatische Änderungen.
- Teilnahme am Workshop zum Salt Club und US-D Workshop in Rapid City; Vorstellung der Arbeiten zur Online FEP Datenbank und zum Salt Knowledge Archive.
- Teilnahme am Meeting der EBS Task Force in Barcelona. Präsentation erster Ergebnisse zu Task 9 FEBEX.
- Teilnahme am dritten Interim WG-Meeting zum IAEA Projekt MODARIA 2.
- Teilnahme an der Euradwaste Konferenz in Pitesti.
- Teilnahme am 3rd Plenary Meeting des OECD/NEA Crystalline Club, inkl. Topical Session zum Thema "Data acquisition, processing and management for model development", Kompilation und Überarbeitung des CRC Status Reports.

TA2:

- Benchmark Sensitivitätsanalyse: Durchführung weiterer Analysen und Ableitung von Schlussfolgerungen anhand der verfügbaren Daten zu den bisher behandelten Endlagersystemen. Vortrag auf der IHLRWM in Knoxville, TN (USA) zum Thema Sensitivity Analysis in Repository Performance Assessment: Findings from an International Exercise. Abstimmung mit den Partnern über weiteres Vorgehen.
- Durchführung weiterer Tests mit der Methode SobolHDMR.

4. Geplante Weiterarbeiten

TA1:

- Teilnahme an der kommenden Sitzung der IGSC und der nächsten IGSC Core Group Sitzung. Vorbereitung eines gemeinsamen Workshops von IGSC und FSC zum Thema Kommunikation von Ungewissheiten.
- Fortsetzung der Arbeiten zu Task 9 FEBEX.
- Teilnahme am nächsten EBS Task Force Meeting in Sitges, Spanien.
- Teilnahme am vierten Technical Meeting des IAEA Projekts MODARIA 2.
- Teilnahme am Symposium zu Wissenserhalt und Markierung von geologischen Tiefenlagern in Zürich.
- Sichtung von Analoga-Studien zur Untermuerung von Sicherheitsnachweisen für Endlagerkonzepte in Kristallingestein. Teilnahme am 15.NAWG Workshop in Japan.
- Fertigstellung des Berichts zur FEP Datenbank und zum Salt Knowledge Archive.
- Fertigstellung des CRC Status Reports.

TA2:

- Integration der Methode SobolHDMR 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. Durchführung eines Workshops im November.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019
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: Übernahme des geologischen Modells der BGR für das Endlagerstandortmodell von ANSICHT-Nord.
- AP3.2: Die Eingangsparameter für die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen bezüglich dem Abfallinventar, der Endlagergeometrie, der Radionuklidmobilisierung und dem Radionuklidtransport wurden festgelegt.
Es wurden deterministische langzeitsicherheitsanalytische Rechnungen zum Radionuklidtransport für das Endlagerstandortmodell von ANSICHT-Nord und ANSICHT-Süd mit den REPOTREND Modulen CLAYPOS und POSA durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet.
Für das Endlagerstandortmodell ANSICHT-Süd wurde zur Überprüfung der Ergebnisse ein Vergleich mit jenen der Nagra in der Studie Opalinuston für das Züricher Weinland vorgenommen.
- AP3.4: Die Modellierungsstrategie für die Rechnungen zum Gastransport mit TOUGH2 wurde festgelegt.
Die zeitliche Entwicklung der Gasbildungsrate und die gebildete Gasmenge wurden für das aktuell vorgesehene Endlagerkonzept für das Endlagerstandortmodell Nord berechnet, die Ergebnisse dokumentiert und der BGETEC als Grundlage für deren Modellierungsarbeiten übergeben.
Es wurde eine Literaturrecherche bezüglich der Zweiphasenflussparameter in Tongestein durchgeführt.
Die Daten für die Eingangsparameter der Rechnungen zum Gastransport bezüglich der Gesteinsparameter, dem Zweiphasenfluss und der Gasbildung wurden zusammengestellt.
Es wurde ein 3D-Rechenmodell inklusive der Grubengebäudestruktur für den ewG des Endlagerstandortmodells ANSICHT-Nord erstellt und erste Testrechnungen mit der Version PETRASIM von TOUGH2 durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3.1: Erstellung des hydrogeologischen Modells für die Rechnung zur Grundwasserströmung mit d^3f_{++} .
- AP3.2: Festlegung von Bandbreiten für die Parameterungewissheiten der Eingangsgrößen der Rechnungen für das Endlagerstandortmodell ANSICHT-Nord.
Durchführung von probabilistischen Rechnungen zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse.
- AP3.4: Durchführungen von Rechnungen zum Gastransport für das Endlagerstandortmodell Nord mit der TOUGH2-Version von PETRASIM.
Festlegung des Radionuklidquellterms für C-14 und Durchführung von Rechnungen zur Ausbreitung von C-14 in der Gasphase und der flüssigen Phase.
Übertragung des Rechenmodells auf die TOUGH2-Version TOUGH2-GRS.
Durchführung von Vergleichsrechnungen zwischen den Programmversionen PETRASIM und TOUGH2-GRS.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 wurden die Arbeiten zum Arbeitspaket 2 weitergeführt. Das aktuelle Verschlusskonzept, das im vorherigen Projekt ANSICHT entwickelt wurde, wurde komplett überprüft. Neben den Änderungen am Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher ergaben sich für die übrigen Verschlussbauwerke nur kleine Änderungen hinsichtlich der geometrischen Verhältnisse der jeweiligen Komponenten zueinander. Dieses angepasste Verschlusskonzept dient jetzt als Grundlage für die Nachweisstrategie zur Barrierenintegrität und die darin zu führenden Einzelnachweise.

Eine weitere Grundlage für den Integritätsnachweis stellen die Kriterien dar, anhand derer die Integrität nachgewiesen werden kann. In diesem Zusammenhang wurde damit begonnen, zunächst allen Komponenten der Barrieren Sicherheitsfunktionen zuzuweisen. Um zu erreichen, dass diese Sicherheitsfunktionen erfüllt werden können, muss für jede Komponente ein sogenanntes Leistungsziel definiert werden. Als Beispiel sei hier genannt, dass ein Dichtelement aus Bentonit als Leistungsziel einen Quelldruck von 1 MPa erreichen muss, damit es die geforderte Abdichtwirkung erreicht. Erfahrungsgemäß dauert es einige Jahre ggf. sogar Jahrzehnte bis dieser Quelldruck im Zuge der Aufsättigung des Elementes mit Wasser erreicht wird. Damit dieses Leistungsziel erreicht werden kann, bedarf es wiederum geeigneter Konstruktionsanforderungen, die dafür eingehalten werden müssen. Im Berichtszeitraum wurden erste Sicherheitsfunktionen, Leistungsziele und Konstruktionsanforderungen für einzelne Barrierekomponenten definiert.

Der Nachweis zur strukturellen Integrität umfasst sechs Einzelnachweise:

- Strukturelle Stabilität (auch als ‚Tragfähigkeit‘ bezeichnet)
- Rissbeschränkung
- Verformungsbeständigkeit
- Filterstabilität
- Langzeitbeständigkeit (auch als ‚Dauerhaftigkeit‘ bezeichnet)
- Herstellbarkeit

Mit der Aufstellung der Kriterien für die einzelnen Nachweise wurde begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Entwicklung konzeptueller Modelle für die einzelnen Barrierekomponenten.
- In Anlehnung an das konzeptuelle Modell soll eine Vervollständigung der individuellen Sicherheitsfunktionen, der dazu notwendigen Leistungsziele der Komponenten und der damit verbundenen Konstruktionsanforderungen erfolgen.
- Gemäß der Nachweisstrategie soll mit der Durchführung des Nachweises zunächst zur strukturellen Integrität begonnen werden. Dazu sind zunächst die Lastfälle für die Barrieren zu ermitteln. Dies soll mit Hilfe des FEP-Kataloges erfolgen, in dem alle Prozess, die in und um das Endlager ablaufen, beschrieben sind. Ein entsprechender FEP-Katalog wurde im vorherigen Projekt ANSICHT entwickelt und liegt somit vor.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 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 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 weiteren Arbeitsgesprächs mit BGR zur Diskussion der Probenahme, Analysemethoden, sowie Auswertung und Interpretation der hydrogeochemischen Daten am Standort Haren (Emsland).
Durchführung von drei Arbeitstreffen zur Erarbeitung einer Strategie für die Implementierung der Redoxprozesse. Detaillierte Auswertung der geochemischen Daten am Standort Haren und Modellrechnungen mit PHREEQC zur Identifikation gelöster und ausgefallter Spezies, die die Redoxverhältnisse bestimmen.
Arbeitstreffen mit dem G-CSC Frankfurt zur finalen Implementierung des aktualisierten WEIMAR-Konzepts zur Auflösung und Ausfällung von Calcit.
- AP3: Durchführung von Laborexperimenten zum Vergleich der bei HZDR und GRS durchgeführten Batch-Methoden und deren Optimierung.
Begleitung von einer Studien-, einer Bachelor- sowie einer Masterarbeit zur Erweiterung der Datenbasis für die Sorption von Europium an Quarz und Orthoklas.
Planung und Durchführung von umfangreichen Laborexperimenten (Batchexperimente, Titrationsexperimente, Transportversuche) im Rahmen von den o. g. Abschlussarbeiten zur Erweiterung und Verifizierung bestehender Datengrundlagen.
- AP6: Durchführung eines Arbeitstreffens mit den Verbundpartnern in Leipzig zur Diskussion der Ergebnisse und Koordinierung der weiteren Arbeiten.
Aktualisierung der Internetseite des Smart-K_d-Konzepts.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Durchführung weiterer Arbeitstreffen zur Weiterentwicklung des Konzepts zur Implementierung von Redoxprozessen.
- AP2: Entwicklung einer Vorgehensweise zur Verifizierung des aktualisierten WEIMAR-Konzepts und Beginn der Verifizierungsrechnungen mit dem Code PHAST.
- AP3: Durchführung weiterer gemeinsamer Titrationsexperimente an Quarz und Orthoklas mit der neuen Apparatur des Verbundpartners KIT-INE zur automatisierten Durchführung von Säulenversuchen und auch Säulentitrationen.
Abschluss experimenteller Arbeiten zur Verifizierung bestehender Daten (Batchsorptionsexperimente).
Abschluss von Sorptionsexperimenten in Anwesenheit von Liganden (Sulfat) in unterschiedlicher Konzentration.
Abschluss der Bachelor- und Studienarbeiten, fortlaufende Betreuung von zwei Masterarbeiten.
- AP6: Durchführung eines weiteren Projekttreffens mit den Verbundpartnern HZDR und KIT-INE am HZDR in Dresden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 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 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: Bewertung der vorhandenen geochemischen, hydrogeologischen und mineralogischen Daten am Standort Haren (Emsland), Vergleich verschiedener Methoden zur Ableitung konsistenter und realistischer Redoxprofile
 Weitere Erarbeitung einer Strategie für die Implementierung der Redoxprozesse. Update der relevanten Redoxspezies und -reaktionen und der zugehörigen thermodynamischen Daten
- AP3: Vergleich vorhandener Daten (Batchversuche und spektroskopische Ergebnisse) für Orthoklas, Quarz und Muskovit in Zusammenarbeit mit GRS
 Sorptionsmechanismus für Thorium auf Muskovit: starker Einfluss des Hintergrundelektrolyten auf die Oligomerisierung; Sorptionsexperimente in Anwesenheit von Liganden (Sulfat) in unterschiedlicher Konzentration mittels SXD
 Vorversuche zur Bestimmung geeigneter Reaktionsparameter für Experimente zum Sorptionsverhalten von Pu(III) auf Eisenphasen (Hämatit)
- AP6: Projekttreffen mit den Verbundpartnern GRS und KIT-INE in Leipzig, Update der Internet-Präsenz unter „www.smartkd-concept.de“

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Weiterentwicklung des Konzepts zur Implementierung von Redoxprozessen sowie Arbeitstreffen mit dem G-CSC Frankfurt zur entsprechenden Codierung
- AP2: Entwicklung einer Vorgehensweise zur Verifizierung des aktualisierten WEIMAR-Konzepts
- AP3: Ermittlung der Protolysekonstante für Orthoklas, Modellierung der Sorption dreiwertiger Ionen an Feldspäte, Ergebnisse sollen zusammen mit spektroskopischen Daten zu Publikation führen; Identifizierung erster wichtiger Sorptionskomplexe auf Orthoklas mittels Oberflächenröntgenbeugung
 Entwurf einer Publikation zum Th-Sorptionsmechanismus; Fortführung Charakterisierung und Aufklärung des Einflusses des Hintergrundelektrolyten; Durchführung von Batchversuchen zur Charakterisierung von Pu(III) Sorption auf Hämatit und Vorbereitung von SXD Experimenten
- AP6: Durchführung eines weiteren Projekttreffens mit den Verbundpartnern GRS und KIT-INE in Dresden, kontinuierliche Pflege der Internet-Präsenz

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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: Installation der ÄktaPure Anlage
Teilnahme am Einführungskurs
Erste Versuche mit einer Sandsäule (pH-Sprünge)
Besuch zweier Mitarbeiter von GRS Braunschweig (Titrationsversuche mit GRS Quartz Sand in einer Säule): Es wurde nachgewiesen, dass der Sand auch bei niedrigem pH Ladung aufweist (Abweichung vom bisher unterstellten klassischen Silica Verhalten). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich bei niedrigem pH keine Unterschiede des Ladungsverhaltens bei verschiedenen Anion (Chlorid, Perchlorat und Sulfat) ergeben.

AP3: Projekt Meeting in Leipzig / Braunschweig

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3: Besuch einer Mitarbeiterin von GRS Braunschweig zur gemeinsamen Durchführung von Titrationsversuchen mit Feldspatsäulen.
Fertigstellung des Modells für Feldspat-Ladungsverhalten und Adsorption von Europium an Feldspat.
EXAFS Untersuchungen im Eu-Quartz System.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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. Obwohl der Effekt schon früh erkannt und qualitativ beschrieben wurde, stellte sich heraus, dass die Modellbeschreibung des viskosen Verhaltens in Verbindung mit seiner thermischen Aktivierung offene Aspekte aufweist, für die die bisher erzielten Rechercheergebnisse nicht zufriedenstellend sind. Die Recherche wird deshalb weitergeführt.

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 die deren Ermittlung Langzeitversuche erforderlich sind, wird derzeit recherchiert.

AP2: Die Zusammenstellung versuchstechnischer Grundlagen wurde weitergeführt. Dabei erfolgte 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. Untersuchte Rezepturzusammensetzungen wurden seitens der TUBAF mitgeteilt.

AP3: Im Rahmen des Projektes LASA wurde das Verformungsverhalten von Sorelbeton unter triaxialer Druckbelastung und Temperaturerhöhung experimentell erfasst. Die Aufbereitung der Versuchsdaten wurde weitergeführt. Aus den Versuchsdaten wurden Einzeleffekte isoliert, die durch einzelne Teilstoffmodelle abgebildet werden. Mit der Anpassung der Parameter aus den Teilstoffmodellen an die Versuchsergebnisse 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 insbesondere des viskosen Verhaltens bei thermischer Aktivierung auf Salz- und Sorelbeton wird fortgesetzt.

AP2: Die Ergebnisse der Anfrage zu den Sorelbetonrezepturen werden ausgewertet.

AP3: Die Isolierung von Einzeleffekten aus den Versuchsdaten mit der Zielsetzung, die Parameter von Teilstoffmodellen anzupassen, wird fortgesetzt. Mit der Parameteranpassung einzelner Teilstoffmodelle, die Aspekte des Langzeitverhaltens betreffen, wurde begonnen.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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: Gewinnung von Großbohrkernen und Salzblöcken durch 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. Finale Testversuche zur Regelungssoftware und zur Messwerterfassung. Einbau Abdichtungssystem aus Salzschnittblöcken ohne Fugenfüllung. Durchführung von zwei Fehlversuchen (Schädigung Gummiummantelung) mit nachfolgender Modifikation Ummantelung und Regelungssoftware.
- AP4: Strategieentwicklung zur rechnerischen Simulation Abdichtungselement mit Fugensystem ohne Füllung. In diesem Rahmen einige prinzipielle Lösungsmöglichkeiten vorgesehen und Aufwand/Vorteile/Nachteile verglichen. Arbeiten in Form von numerischen Simulationen an einfachen aufgabenbezogenen Funktionsmodellen durchgeführt für die Variante mit den Interface-Elementen mit der Zielsetzung der Überprüfung der Möglichkeiten, Anwendungsbereichen und Begrenzungen von Interface-Elementen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Abschluss Gewinnung von Großbohrkernen und Salzblöcken durch GTS Teutschenthal.
- AP2: Herstellung von Salzschnittblöcken für ein Abdichtungssystem mit Fugenfüllung.
- AP3: Dummyversuch zur Verifikation der modifizierten Regelung. Einbau Abdichtungssystem aus Salzschnittblöcken ohne Fugenfüllung und Versuchsdurchführung.
- AP4: Numerische Simulationen zur rechnerischen Machbarkeit eines Abdichtungselementes mit Fugen ohne Füllung mit Hilfe von Interface-Elementen in FLAC3D. Implementierung eines viskosen (zeitabhängigen) Verhaltens für die Interface-Elemente und die verbleibende Fugenbreite als FISH-Funktion in FLAC3D. Durchführung weiterer rechnerischer Simulationen zur prognostischer Analyse und versuchstechnischen Reanalyse.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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. In Abstimmung mit der BGE erfolgte die Bereitstellung bzw. Herstellung der Untersuchungsmaterialien.
Im Rahmen des Arbeitskreises Betonkorrosion (AKB) erfolgt z. Z. eine allgemeine Zusammenstellung von Materialkennwerten von Salz- und Sorelbetonen sowie deren Verhalten im Kontakt zu salinaren Lösungen. Die gewonnenen Erkenntnisse und Daten fließen auch in das Projekt THyMeCZ mit ein.
- AP2: Die Proben für die hydraulisch-chemischen Untersuchungen wurden hergestellt und die ersten Proben an den HC-Messstand angeschlossen. Es zeigte sich, dass die kom-

binierten Prüfkörper mit dem Sorelbeton A1 wesentlich permeabler sind als die Probekörper bestehend aus dem Salzbeton M2. Hier konnte erst in einem der 4 angeschlossenen Probekörpern eine Permeabilität ermittelt werden, die bereits nach 14 Tagen auf $k=10^{-18} \text{ m}^2$ abgenommen hatte.

- AP3: Zunächst wurden in den 4 Autoklaven des HMC-Messstandes die monolithischen Probekörper des A1 und D4 untersucht, die bereits 2015 im Projekt LAVA hergestellt worden waren. Im 2. Quartal 2019 wurden dann die 2019 in der MPA hergestellten kombinierten Probekörper mit dem Salzbeton M2 in die Autoklaven eingebaut. Die gemessenen N₂-Gaspermeabilitäten lagen bei einem Manteldruck von 10 bar bei ca. $k=10^{-18} \text{ m}^2$; nach Manteldruckerhöhung auf 50 bar verringerte sich die Permeabilität auf $k<10^{-20} \text{ m}^2$. Die weiteren zwei Proben werden derzeit mit NaCl- bzw. IP21-Lösung beaufschlagt und die Entwicklung der Permeabilität beobachtet.
- AP4: Für die THC-Versuche wurde ein Messstand aufgebaut, wobei ein Aufbau entsprechend den HC-Versuchen in einem Klimaschrank realisiert worden ist. Es erfolgt zurzeit die Entwicklung und Herstellung der Korrosionslösungen bei 60 °C. Erste Testmessungen mit NaCl-Lösung (ges.) wurden bereits durchgeführt.
- AP5: Im TM Messstand wurde der erste Versuch mit Salzbeton M2 vollständig abgeschlossen. Dabei erfolgte zunächst eine stufenweise Erhöhung der Spannungen (nahezu isotroper Spannungszustand) auf 5 MPa, 10 MPa und 15 MPa bei 30 °C. Anschließend wurde der Spannungszustand erhalten und die Temperatur auf 60 °C und 90 °C erhöht und final wieder auf 60 °C gesenkt. Dabei konnte ein deutliches spannungs- und temperaturabhängiges Verformungsverhalten des M2 festgestellt werden. Aktuell wird der gleiche Versuchsablauf am Material A1 durchgeführt.
- AP6: Der Aufbau der THMC-Messstandes wird zurzeit konzipiert. Einzelne Komponenten wurden bei Herstellern angefragt; im 3. Quartal erfolgt der Besuch einzelner Hersteller.
- 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

Alle Versuche werden entsprechend des aufgestellten Versuchsplans fortgeführt. Der THC-Messstand wird im 3. Quartal mit Probekörpern bestückt. Die Versuche der kombinierten Probekörper des M2 in dem HMC-Messstand werden im 3. Quartal beendet sein, dann werden diese Probekörper ausgebaut und durch kombinierte Probekörper des Sorelbetons A1 ersetzt. 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 vorkompakterter 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 kompakterter 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 haben zwei Projekttreffen stattgefunden: das erste Projekttreffen am 12.02.2019 bei dem IfG in Leipzig und das zweite Treffen am 08.05.2019 bei dem Projektpartner BGE-TEC in Peine. Innerhalb der Projekttreffen wurde eine Materialauswahl für das zu untersuchende Salzgrus getroffen und es wurden über experimentelle Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten diskutiert. Zudem wurden erste Modellierungsergebnisse des Triaxialversuchs TK031 gezeigt. Die GRS beteiligt sich an den Modellierarbeiten aufgrund langjähriger Erfahrungen mit dem Simulator CODE_BRIGHT.

Die GRS konnte bereits während der Modellierungsarbeiten feststellen, dass die aus vorherigen Projekten vorhandenen Parametersätze für Salzgrus nicht geeignet sind, um das Verhalten des TK031 abzubilden. Nach Gesprächen mit den Entwicklern von CODE_BRIGHT konnte die GRS tiefere Erkenntnisse über die implementierten Stoffmodelle für Salz gewinnen, welche für die zukünftigen Modellierungsarbeiten genutzt werden.

Im September 2019 wird ein gemeinsamer Workshop mit den Kollegen des WEIMOS Vorhabens stattfinden, an dem auch die amerikanischen Projektpartner teilnehmen werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung der einzelnen APs entsprechend der Vorhabenbeschreibung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Beitrag zum US/German Workshop am 28.-29.Mai 2019 an der South Dakota School of Mines, SD, USA

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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 vorkompakterter 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 kompakterter 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 haben zwei Projektgespräche stattgefunden und zwar am 12.02.2019 bei IFG in Leipzig und am 08.05.2019 bei BGETEC in Peine stattgefunden.

Bzgl. der modelltechnischen Strategie wurden die Anforderungen an die Modelle weiter präzisiert, was eine Eingrenzung der Bandbreite durchzuführender Versuche zulässt. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Modellierung der Barrierefunktion von Salzgrus bei kleinen Porositäten, was eine wesentliche Zielsetzung des Projektes darstellt.

Die Nachrechnung des Laborversuchs TK031 der BGR wurde weitergeführt. Es wurden die einzelnen Teilstoffmodelle der Stoffmodelle C-WIPP und Hein separiert und Einzeleffekte nachvollzogen, die aus dem Versuch TK031 isoliert wurden. Während für die erste Nachrechnung die alte Parametrisierung genutzt wurde, die auf den Versuchen von Korthaus basierte, erfolgten weitere Berechnungen verbesserten Parameteranpassungen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Weitere Bearbeitung des AP3 entsprechend der Vorhabenbeschreibung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Auf dem deutsch-amerikanischen Workshop, der vom 28.05. bis 30.05.2019 in Rapid City stattfand, wurde das Projekt Kompass und seine Zielsetzungen sowie exemplarisch der Bearbeitungsstand präsentiert.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

AP1: Zur Durchführung der Laborversuche wurden bei der GSES 2 t synthetische Salzgrusmischung mit der von der TU BAF im ELSA-Vorhaben entwickelten Rezeptur mOBSM (ohne Überkorn) hergestellt (4 x 0,5 t BigBags). Das Material der Grube Sondershausen repräsentiert Stassfurt-Steinsalz der flachen Lagerung mit einem Feuchtigkeitsgehalt von ca. 0,15 M %. Es wird von allen Partnern für die geplanten Kompaktionsversuche eingesetzt. Der Vorteil gegenüber früheren Untersuchungen (z. B. mit Schnittsalz aus verschiedenen Bergwerken) besteht darin, dass diese Mischung als Referenzmaterial, qualitätsgesichert in beliebiger Menge, wiederbeschafft werden kann.

Als Vorversuche und Basis zur mikroskopischen Charakterisierung der Korngefüge wurden in der beheizbaren ELSA-Kompaktionszelle 3 Kurzzeit-Kompaktionsversuche mit unterschiedlichen Belastungsbedingungen bei Raumtemperatur sowie bei ca. 94 °C durchgeführt. Die erhaltenen Probekörper wurden BGR und SANDIA für Gefügeuntersuchungen übergeben.

Mit den Vorkompaktion zur Prüfkörperherstellung wurde begonnen. Das experimentelle Konzept ist 2-stufig. Im ersten Schritt wird in der „großen“ IfG-Versatzdruckzelle (160 l Volumen) Salzgrus vorkonsolidiert, bis zu einer Restporosität von ca. 10 – 15 % (Versuchszeit ca. 4 Wochen). Aus diesem Block werden kleinere Prüfkörper (l = ca. 20 cm, d = 10 cm) hergestellt. Sie werden als 2. Schritt im Langzeitversuch nach ihrer Charakterisierung (Restporosität, V_p) in speziellen Kompaktionsapparaturen weiter verdichtet. Der erste Vorkompaktionsversuch mit trockenem Probenmaterial läuft.

Die neue IfG-Salzgruskompaktionszelle ist in Teilen gefertigt und wird aktuell mit dem Einbau von Ultraschallgebern komplementiert.

AP3: Als Teil der Benchmark-Rechnungen wurde eine Modellierung des von allen Partnern ausgewählten BGR-Referenzversuchs TK031 mit dem modifizierten cwipp-IfG-Modell durchgeführt. Die Parameterauswahl erfolgte u. a. durch die Anpassung von Kriechphasen oder Belastungsrampen. Mit diesen Parametern war eine zufriedenstellende Nachrechnung des Gesamtversuchs möglich, allerdings sind die Parameter nicht eindeutig bzw. sind bei der Parameterfestlegung Kompromisse erforderlich. In den zukünftigen experimentellen Untersuchungen sollten möglichst lange Kriechphasen realisiert werden, die zuverlässiger angepasst werden können. Auf Basis der vorliegenden Erfahrungen wird die Eignung von cwipp für eine zuverlässige Prognose des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus bis zu vernachlässigbaren Endporositäten hin als zweifelhaft eingeschätzt.

4. Geplante Weiterarbeiten

In AP1 wird nach Fertigstellung der neuen isostatischen Triaxialzelle die Eignung der Zelle mit den vorkompaktierten Prüfkörpern der großen IfG-Versatzdruckzelle in Vorversuchen geprüft. Parallel findet die Entwicklung einer hydraulischen Belastungseinrichtung mit einer zuverlässigen Volumenmessung statt.

Für AP3 wird ausgehend von den Simulationsrechnungen für den BGR-Referenzversuch LZV TK 031 eine Strategie zur Verbesserung der vorhandenen Prognosewerkzeuge entwickelt.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

- AP1: Indexversuche an nicht qualifiziertem Salzgrus zur Vorkompaktion mit variierten Beanspruchungen und Wassergehalten zur Entwicklung eines Verfahrens zur biaxialen Vorkompaktion von Salzgrus in Drucklagerungszellen. Präzisierung Versuchsablauf, Erhöhung Genauigkeit Endporositätsmessung, Einstellung vordefinierter Wassergehalte.
- AP3: I) Vergleichende Analyse der vorhandenen Modellansätze zur Salzgruskompaktion:
- Konkretisierung und Systematisierung des Untersuchungsbedarfs (→ Laborprogramm) und des Entwicklungsbedarfs (→ Stoffmodell-Weiterentwicklung).
 - Erstellung eines Konzeptes für die Optimierung des Entwicklungsprozesses auf der Basis einer strukturierten vergleichenden Modell-Darstellung für die verfügbaren Kompaktions-Stoffmodelle.
 - Konkretisierung der Kompaktions-Stoffmodelle bzgl. Gemeinsamkeiten, Unterschieden und Untersuchungsbedarf.
 - Vergleich der Ansätze zur Beschreibung der Verheilung von Steinsalz mit den Ansätzen zur Beschreibung der Kompaktion von Salzgrus.
 - Entwurf eines Schemas für systematische Basis-Berechnungen zur rechnerischen Analyse ausgewählter Abhängigkeiten / Einflussfaktoren mit dem Ziel Plausibilitätslücken, Entwicklungsbedarf und Untersuchungsbedarf zu veranschaulichen und zu konkretisieren.
- II) Vergleichende Analyse ausgewählter experimenteller Daten:
- Rechnerische Analyse ausgewählter experimenteller Daten zur Bewertung der Anwendbarkeit/Vergleichbarkeit der vorhandenen Kompaktions-Stoffmodelle.
 - Entwicklung einer Vorgehensweise zur einheitlichen, modellunabhängigen Normierung und Reanalyse von Versuchsergebnissen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Vorkompaktionsversuche an qualifiziertem Salzgrus mit Variation von Kompaktionsdruck (5MPa, 10 MPa, 15 MPa) und Wassergehalt (0,3 %, 0,5 %, 1 %) zur Quantifizierung der für eine definierte Endporosität erforderlichen Lasthistorie.
Durchführung triaxialer Kompaktionsversuche (Indexversuche) entsprechend dem erarbeiteten Untersuchungsbedarf.
- AP3: Erweiterung der Analyse der Stoffmodelle durch Integration des Modells von Callahan (Sandia).
Auswertung und Analyse der Indexversuche zur Konkretisierung und Planung eines geeigneten Laborversuchsprogramms als experimentelle Basis zur Validierung der relevanten Einflussfaktoren für das Kompaktionsverhalten des Salzgruses.
Erarbeitung der Anforderungen und Entwicklungsschritte für ein bezüglich Praktikabilität, Funktionalität, Plausibilität und Realitätsnähe geeignetes Kompaktionsstoffmodell auf Grundlage der durchgeführten Indexversuche, der vergleichenden Analyse vorhandener Stoffmodelle sowie der Reanalyse ausgewählter Versuche.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

AP2: Die unterschiedlichen Anforderungen an das Ausbausystem wurden im Berichtszeitraum zusammengestellt und in einem Teilbericht zusammengefasst. Anforderungen ergeben sich aus regulativen Vorgaben aus dem Atom- und Bergrecht sowie weiteren Normen und Richtlinien, betrieblichen, geomechanisch/geologischen, hydraulischen, (geo-)chemischen sowie langzeitsicherheitsrelevanten Aspekten. Bei den geochemischen bzw. langzeitrelevanten Aspekten sind vor allem eine Reduzierung der Gasproduktion, die Schaffung eines für Dichtbaustoffe (Bentonit) günstigen geochemischen Milieus und die Begrenzung von organischen Bestandteilen bzw. der mikrobiellen Aktivität hervorzuheben. Die Beschreibung der geologisch/geomechanischen Randbedingungen stützt sich im Wesentlichen auf den Erkenntnissen aus dem Vorhaben ANSICHT. Zusätzlich wurde untersucht, in welcher Art und Ausprägung Trennflächen innerhalb des Wirtsgesteins zu erwarten sind und welche geomechanischen Eigenschaften diesen zuzuordnen sind. Neben einer Literaturrecherche wurden dazu auch die Experten der BGR kontaktiert. Im Ergebnis können für die beiden Referenzmodelle NORD und SÜD unterschiedliche Ausprägungen und Eigenschaften erwartet werden. Der Opalinuston (SÜD) ist durch die Arbeiten der Nagra und das URL Mont Terri sehr gut erkundet. Bedingt durch die Einregelung der Tonminerale weist der Opalinuston eine Feinschichtung auf. Diese Schichtung bedingt die Anisotropie felsmechanischer und hydrogeologischer Eigenschaften. Die Feinschichtung wird durch eine stoffliche Heterogenität im cm-Bereich überlagert. Es handelt sich dabei nicht um rhythmische Wechsellagerungen, wie beispielsweise für das Modell Nord beschrieben. Innerhalb des Opalinustons sind verschiedene tektonische Überprägungen und damit auch Falten/Kluftsysteme bekannt. Am besten untersucht sind diese am Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz. Hier ist besonders die sogenannte "main fault" hervorzuheben. Dabei handelt es sich um eine 0,8 bis 3,0 m mächtige Verwerfung mit ca. 80 m Versatz. Die Zone ist in sich sehr heterogen aufgebaut. Innerhalb der Faltung treten Scherformationen und Verschiebe vom Mikro- bis Metermaßstab auf. Mechanische Untersuchungen an den Störungen sind gegenwärtig nicht bekannt. Untersuchungen an ähnlichen tektonischen Strukturen zeigen herabgesetzte Festigkeitswerte. Im Modell Nord, genauer im Barremium, dominieren dunkelgraue und zum Teil schwachbituminöse Ton- und Tonmergelgesteine. Weite Teile des unteren Barremium werden vom sogenannten Hautplättertton gebildet. Die Blättertone sind in 20 bis 30 Schichten Wechsellagerungen mit Tongesteinen anzutreffen. Die Mächtigkeit der Blättertone schwankt zwischen 2 bis 5 m. Dabei sind die Blättertone selbst feinlaminierte, bituminöse Sedimente mit einer Dicke der hell/dunkel-Paare zwischen 50 bis 150 µm. Trotz der anderen Entstehungsprozesse sind diese Blättertone in ihren mechanischen Eigenschaften mit den Störungen in Mont Terri vergleichbar. Im Standortmodell NORD müssen bei der Dimensionierung des Ausbaus somit regelmäßig auftretende Zonen mit verminderter Festigkeit bzw. verändertem (Spröd-)Bruchverhalten berücksichtigt werden. Die Erkenntnisse fließen direkt in die Arbeiten der DMT (genauer AP3) ein.

AP4: Aus ersten Modellrechnungen und den Untersuchungen der APs 1 und 2 wurden von DMT und BGE TEC der Einsatz eines geschlossenen, betonbasierten Ausbausystems als Vorzugsvariante für alle langlebigen Grubenbaue identifiziert. DMT ermittelte verschiedene Literaturbeispiele zu geeigneten Betonrezepturen (low pH-Beton). Diese bilden die Grundlage für die eigene Baustoffentwicklung (DMT AP4) und die weiteren Arbeiten zu Wechselwirkungen und Langzeitverhalten (AP5 und 6).

4. Geplante Weiterarbeiten

AP4 bis 6:

Die Materialentwicklung wird von DMT weitergeführt (AP4). Aufbauend darauf identifiziert BGE TEC die wesentlichen Wechselwirkungen mit dem Porenwasser und Bentonit (AP5). Diese Untersuchungen dienen als Basis für die geplanten Alterationsberechnungen. Die Vergabe der Berechnungen wird vorbereitet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

Die Arbeitspakete AP1 und AP2 wurden abgeschlossen. Schwerpunkt der Arbeiten im Berichtshalbjahr waren die Arbeitspakete AP3 und AP4.

Die Kenntnis der Eigenschaften von Tongesteinen ist eine wichtige Voraussetzung für die Ermittlung erforderlicher mechanischer Ausbaueigenschaften zur Gebirgsbeherrschung. Für acht Tongesteinsformationen im Teufenbereich von 170 m bis 800 m wurden die gebirgsmechanisch relevanten Eigenschaften zusammengetragen und gegenübergestellt und Tendenzen abgeleitet. Die Eigenschaften von Tongesteinen variieren je nach Art und Anteil der Tonminerale am Gesamtgestein sowie durch diagenetische Veränderungen und durch tektonische Beanspruchung erheblich. Die einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit nimmt z.B. bei geringer Abnahme des Wassergehaltes bereits deutlich zu. Tendenziell nehmen die Festigkeit, E-Modul, Winkel der inneren Reibung und auch die Kohäsion mit der Teufenlage der Tonsteinformation zu. Der Wassergehalt und die Porosität der Tongesteine nehmen dagegen mit zunehmender Teufe ab.

Im Berichtshalbjahr wurde mit geotechnischen Modellierungen begonnen. Hierfür wird die Software FLAC 2D (der Firma ITASCA) genutzt. Das Verhalten verschiedener Ausbausysteme wurde für unterschiedliche gebirgsmechanische Bedingungen betrachtet. Es wurden sowohl sohloffene als auch geschlossene Ausbausysteme untersucht. Bei den geschlossenen Systemen wurde zwischen starren und begrenzt nachgiebigen Systemen unterschieden.

In den Berechnungen wurden folgende Parameter variiert:

- Art und Geometrie des Ausbausystems Rechteck, Bogenausbau (mit und ohne Sohlschluss), starrer und nachgiebiger Kreisquerschnitt und Ellipse
- Querschnittsgröße je nach Ausbautyp 28 m² bis 45 m²
- Ausbaustärke 30 cm bis 50 cm
- Festigkeit der Baustoffschale 20 MPa bis 50 MPa
- Teufenlage des Grubenbaus 500 m bis 1000 m
- Gebirgsfestigkeit 5 MPa bis 15 MPa
- Seitendruckverhältniss σ_h/σ_H 0,5 bis 1,5
- Bankung der Tongesteinsschicht 30 cm bis 90 cm

Um den Einfluss zementhaltiger Baustoffe auf quellfähige Tonminerale (Bentonit) zu minimieren, wurden sogenannte low-pH-Baustoffe entwickelt. Diesen Baustoffen wurde besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Auf der Basis der Literaturrecherche konnten veröffentlichte Rezepturen für low-pH-Beton identifiziert werden, die als geeignete Baustoffmaterialien in Frage kommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3: Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Simulationsrechnungen zu einer Matrix aus Gebirgseigenschaften, Teufenlage und geeignetem Ausbausystem.

Weiterführung der Simulationsrechnungen unter besonderer Berücksichtigung der geotechnischen Eigenschaften an den Standorten Deutschland Nord und Deutschland Süd.

Simulation der Interaktion von Parallelstreckensystemen für den Teufenbereich von 500 m bis 1000 m.

AP4: Herstellung von Rezepturen von low ph Betonen auf Basis heimischer Rohstoffe. Durchführung von Laborversuchen an den entwickelten Baustoffen. Hierzu zählt die Ermittlung von Kennwerten wie Konsistenz, Erstarrungsverhalten, Festigkeit und Verformungsverhalten (Schwinden). Ergänzend wird ein werkgemischter Trockenbaustoff in Form als spritzbar eingestuft Rezeptur vergleichbaren Untersuchungen unterzogen.

Optimierung der Eigenschaften von Nachgiebigkeitselementen in geotechnisch numerischen Modellen.

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: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
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

AP1: Mit Projektstart begannen die Arbeiten am AP1 (Grundlagen für eine selektive Rückholung). Die Beweggründe für eine selektive Rückholung sind, wie auch für die vollständige Rückholung heute nicht bekannt. Eine selektive Rückholung kann z. B. nur bestimmte eingelagerte Abfalltypen betreffen. Im geplanten Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente sind unterschiedliche Abfallarten mit unterschiedlichen Inventaren und Zusammensetzungen eingelagert. Eine Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung kann ggf. auch erfolgen. In kleinen Mengen sind solche Abfallarten bereits durch die Brennelementstrukturteile im Endlager vertreten. Die Unterbringung von verschiedenen Abfallarten in einer Anlage wird allgemein als "Co-Disposal" bezeichnet. Alle bisher in Deutschland entwickelten Endlagerkonzepte folgen dem Grundsatz einer nach Abfallarten getrennten Einlagerung. Innerhalb einer Einlagerungszelle, einer Strecke oder eines Feldes werden nur Abfälle der gleichen Art eingelagert. Eine gezielte Rückholung einzelner Abfallgruppen ist damit grundsätzlich denkbar. Für die drei zu untersuchenden Einlagerungsvarianten (modifiziertes KBS-3 Konzept, multipler ewG oder überlagernder ewG) wurden denkbare Szenarien einer selektiven Rückholung und grundlegende Anforderungen definiert.

AP2: In Abstimmung mit dem parallel bearbeiteten Vorhaben CHRISTA II wurden die neuesten Anpassungen des Einlagerungskonzeptes mit in die Rückholungsplanung aufgenommen. Statt einer BSK, wie noch in KONEKD vorgesehen, werden drei BSK je Bohrloch berücksichtigt. Der in CHRISTA II entwickelte Einlagerungsbereich/Einlagerungsfeld dient als Referenz. Aufbauend auf diesem Einlagerungskonzept wurden die notwendigen Arbeitsschritte zur Rückholung aller Behälter innerhalb eines solchen multiplen ewG-Bereichs bzw. Einlagerungsfeldes beschrieben. Dabei kann weitestgehend auf die aus ERNESTA bekannten bzw. dort entwickelten Techniken und Technologien zurückgegriffen werden. Unter der Annahme, dass alle alten Grubenbaue wiedergenutzt werden und eine Neuauffahrung nicht geplant ist, kann auch auf einen Bohr und Spreng Vortrieb verzichtet werden. Der Versatz/Buffer kann mit Ladern und Baggern gelöst werden.

AP3: Die Untersuchungen zum Systemverhalten des Liners wurden im Berichtszeitraum begonnen. Parallel zu den Arbeiten der BGE TEC bzw. ergänzend dazu wurde an der TU Braunschweig (Institut für Grundbau und Bodenmechanik) eine Studienarbeit begonnen. Unter dem Titel "Untersuchung des Entnahmeprozesses von Brennstabkaskillen aus einem vertikalen Bohrloch in kristallinem Hartgestein" sollen Grundlagen zur Charakterisierung des Sandversatzes geschaffen werden und ergänzende thermo-mechanische Berechnungen zur Auslegung des Bohrlochliners stattfinden. Die Arbeit wird im 2. Halbjahr abgeschlossen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP2 + 3: Die Bearbeitung beider APs wird fortgeführt und soll im folgenden Berichtszeitraum abgeschlossen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Clausthal, Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		Förderkennzeichen: 02 E 11748A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019 bis 31.12.2021	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.521.440,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Langefeld	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Kontaktbereich – Vertiefung Kenntnisstand

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

AP2: Materialuntersuchungen

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

AP3: Vorversuche zur Konzipierung der Versuchsinstallation

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

AP4: In-situ-Voruntersuchungen

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Die Positionierung einer 300 mm-Bohrung zur Ermittlung des Kontaktbereiches wurde festgelegt. Aus dieser Bohrung werden Probenkörper gewonnen, welche dann zur Herstellung von Kernproben für den Kontakt Dichtbaustoff/Gebirge verwendet werden. Die Positionierung einer 70 mm-Bohrung, aus welcher Proben zur Ermittlung der Permeabilität, Porosität sowie der Porengrößenverteilung des Wirtgesteins gewonnen werden, wurde ebenfalls bestimmt.

Ein Arbeitsprogramm für die Laboruntersuchungen der Proben wurde erstellt.

AP2: Als Grundrezeptur für das zu errichtende Bauwerk wurde der Sorelbeton A1 ausgewählt, da für diesen gute Erfahrungswerte vorliegen. Der für den Sorelbeton benötigten Salzzuschlag darf kein Polyhalit sowie Carnallitit enthalten. Als ein Injektionsmittel wird Wasserglas gehandelt. Nach weiteren Injektionsmittel wird recherchiert.

AP3: Für die Injektion wurden Konzepte ausgearbeitet um bei einer Erhöhung der Permeabilität im Kontaktbereich, zwischen Dichtbaustoff und Gebirge, erfolgreich ein Injektionsmittel zu injizieren. Das derzeit favorisierte Konzept basiert auf der Verwendung von Manschettenrohren und wird auf Realisierbarkeit getestet.

AP4: Für die Realisierbarkeit der Versuche wurde in der Grube Teutschenthal eine Strecke im Steinsalz aufgefahren. Dieser Hohlraum wurde vermessen, gescannt und es wurde ein lokales Koordinatensystem etabliert, um ein einfaches Auffinden der entsprechenden Positionen vor Ort zu ermöglichen.

Die in AP1 beschriebene 300 mm-Bohrung wird mit dem Sorelbeton A1 verfüllt und anschließend überbohrt um weitere Proben zur Beurteilung des Kontaktbereiches zu erhalten. Eine weitere Positionsfestlegung für eine Hydrofrac-Bohrung erfolgte ebenfalls. Nach Fertigstellung dieser wird eine Messeinrichtung in die Bohrung zur Erfassung der Pfeilerquerdehnung installiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Durch Bohrungen in der Strecke sollen folgende Parameter des Gesteins untersucht werden:

Mineralogie (qualitativ und quantitativ), Feuchtdichte, Reindichte, Gaspermeabilität, Porengrößenverteilung, Spaltzugfestigkeit.

Kompositproben (bestehend aus Gebirge und dem Zement des Verschlussbauwerkes) sollen hergestellt und der Kontaktbereich zwischen den Materialien untersucht werden.

Die konzipierten Injektionsleitungen werden auf Ihre Funktionalität getestet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11748B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019 bis 31.12.2021	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 39.015,00 EUR	Projektleiter: Dr. Kulenkampff	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

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

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Kontaktbereich – Vertiefung Kenntnisstand

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

AP2: Materialuntersuchungen

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

AP3: Vorversuche zur Konzipierung der Versuchsanstallation

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

AP4: In-situ-Voruntersuchungen

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

AP5: Berichtslegung – Dokumentation, Interpretation, Schlussfolgerungen

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Die Positionierung einer 300 mm-Bohrung zur Ermittlung des Kontaktbereiches wurden festgelegt. Aus dieser Bohrung werden Probenkörper gewonnen, welche dann zur Herstellung von Kernproben für den Kontakt Dichtbaustoff/Gebirge verwendet werden. Die Positionierung einer 70 mm-Bohrung, aus welcher Proben zur Ermittlung der Permeabilität, Porosität sowie der Porengrößenverteilung des Wirtgesteins gewonnen werden, wurde ebenfalls bestimmt. Ein Arbeitsprogramm für die Laboruntersuchungen der Proben wurde erstellt und wird anhand der gewonnenen Proben konkretisiert.

Anhand von Testkörpern wurde ein Verfahren zur quantitativen Ableitung und Darstellung von Porenradienverteilungen aus μ CT-Bildern entwickelt.

AP2-AP4: sind überwiegend von den Projektpartnern zu bearbeiten. Hierüber wird im Zwischenbericht zum Teilprojekt A des Koordinators (TU Clausthal) berichtet.

4. Geplante Weiterarbeiten

Durch Bohrungen in der Strecke sollen von den Partnern folgende Parameter des Gesteins bestimmt werden: Mineralogie (qualitativ und quantitativ), Feuchtdichte, Reindichte, Gaspermeabilität, Spaltzugfestigkeit. Porenradienverteilungen werden durch Hg-Porosimetrie (Partner IBeWa) und μ CT-Messungen (HZDR) bestimmt und abgeglichen.

Kompositproben (bestehend aus Gebirge und dem Zement des Verschlussbauwerkes) sollen hergestellt und der Kontaktbereich zwischen den Materialien untersucht werden.

Die konzipierten Injektionsleitungen werden auf Ihre Funktionalität getestet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Auftragnehmer: BGE Technology GmbH, Eschenstr. 55, 31224 Peine		Förderkennzeichen: 02 E 11749
Vorhabensbezeichnung: Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (TREND)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.1+3.2		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019 bis 28.02.2021	Berichtszeitraum: 01.01.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 563.242,17 EUR	Projektleiter: Bertrams	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die grundlegenden Arbeiten aus AP1 wurden abgeschlossen. Diese umfassten die zusammenfassende Darstellung der relevanten Endlagerkonzepte, der Endlagerbehälterkonzepte, des Stands der Entwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik sowie des Stands der Rückholungskonzepte und -technik.

Die Arbeiten des AP2 befinden sich kurz vor ihrem Abschluss. Für die Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern wurde ein Anforderungskatalog erarbeitet. Dieser Katalog wurde systematisch sortiert und in ein Lastenheft überführt. Mit Hilfe dieses Lastenhefts wurden Optimierungsbedarfe an der Einlagerungsvorrichtung identifiziert und verschiedene Varianten zur Weiterentwicklung erarbeitet. Zurzeit erfolgt einerseits eine Analyse zur Auswahl der Vorzugsvariante, andererseits wird eine Risikobeurteilung der Einlagerungsvorrichtung durchgeführt, um die Sicherheit ihres Betriebs zeigen zu können.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nach Abschluss der vorgenannten Arbeitsschritte, nämlich der Ermittlung einer Vorzugsvariante und der Durchführung einer Risikobeurteilung, kann die optimierte Einlagerungsvorrichtung konstruiert werden. Die Arbeiten zur Erstellung des Lastenhefts, zur Durchführung einer Risikobeurteilung und die Auswahl der Vorzugsvariante liefern wertvolle methodische Grundlagen für die weiteren Arbeiten in den AP3, 4 und 5 zur Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik in den anderen Einlagerungsvarianten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena		Förderkennzeichen: 02 E 11759A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2019 bis 30.04.2022	Berichtszeitraum: 01.05.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 375.308,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Schäfer	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Das experimentelle Programm im Labor und im Untertagelabor Grimsel unter Anwendung von spektroskopischen und mikroskopischen Methoden der Partner FSU und KIT-INE soll dazu beitragen, ein verbessertes mechanistisches Verständnis der Integrität der Bentonitbarriere und des kolloidgetragenen RN-Transports zu erreichen. Es soll die Übertragbarkeit der Labordaten auf natürliche Systeme überprüft und Eingangsdaten für die in der Langzeitsicherheitsanalyse von GRS verwendeten Codes CLAYPOS, COFRAME und d³f++ ermittelt werden. Diese Codes sowie von KIT-INE und FSU genutzte gekoppelte reaktive Transportmodelle werden zur Beschreibung der Feldexperimente weiterentwickelt, angewandt und damit weiter qualifiziert.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Nach Ausbau des LIT-Packers (Durchmesser 360 mm, Länge ca. 800 mm) wurde dieser komplett mittels Computertomographie bei EMPA (CH) gescannt und es wurde begonnen diese zur Verfügung stehenden Daten in ersten Versuchen zur Differenzierung der Klufthohlräume und der verschiedenen Bentonittypen (Ni-/Zn- Montmorillonit, Febex-Bentonit) bzw. der Radionuklid-Vials zu segmentieren. Durchführung einer ersten Kandidatinnen-/Kandidatensichtung für die zu besetzenden Doktorierendenstellen.
- AP2: Die thermodynamischen Simulationsrechnungen der Mischwässer sind abgeschlossen und ein Manuskript der deutschen Aktivitäten ist in der letzten internen Revision. Die von internationalen Modellierungsgruppen durchgeführten CFM thermodynamischen Benchmark Kalkulationen bedürfen hinsichtlich der Verwendung von Silica-Spezies und der Auswahl der Löslichkeitsbestimmenden Festphase einer weiteren Iteration.
- AP3: Ein erstes Arbeitstreffen zur Abstimmung der Arbeiten zwischen KIT, FSU und GRS wurde durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP 1: Erste nasschemische Analysen (ICP-MS, IC) der Kontaktwässer des i-BET Experiments sowie Kolloidanalysen mittels Nanopartikel-Tracking System (NTA) im Vergleich zu Analysen des KIT-INE (ICP-MS, LIBD). Aufbereitung der Tonmineralfraktion von verschiedenen Bentoniten (Febex, MX-80) zur gezielten Untersuchung des Einflusses von akzessorischen Gemengteilen auf die Bentonit-Erosion.
- AP3: Das nächste internationale CFM Partner Meeting wird im Oktober 2019 an der Friedrich-Schiller-Universität Jena durchgeführt und stellt gleichzeitig das Kick-Off Meeting von KOLLORADO-e3 dar. Absprache des experimentellen Programms von KOLLORADO-e3 mit den Arbeiten des CFM- Konsortiums. Weiterhin ist geplant die Arbeiten aus KOLLORADO-e2 und die geplanten Arbeiten von KOLLORADO-e3 auf der Goldschmidt-Konferenz und der MIGRATION Konferenz zu präsentieren.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 E 11759B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2019 bis 30.04.2022	Berichtszeitraum: 01.05.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 371.183,00 EUR	Projektleiter: Dr. Marquardt	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Bentonitquelle mitsamt den enthaltenen Radionukliden (RN) des Long-term In-situ Test (LIT) wurde nach Fixierung der Gelschicht erfolgreich ausgebaut. Der Bohrkern des LIT Versuchs wurde zur Eidgenössischen Material Prüfanstalt transportiert und mittels Computertomographie untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist es, den Status des Experiments, insbesondere Lage und Zustand der RN-Tracer-Vials und der Bentonitgelschicht zu überprüfen. Die Auswertung der Untersuchung dauert noch an. Es stehen neben dem LIT Mock-up noch zwei weitere, jedoch inaktive, Erosions-Experimente am INE zur Verfügung. Mit diesen kann die geplante Probenahme-Strategie, speziell zur Charakterisierung der RN-Diffusion innerhalb des kompaktierten Bentonits und der Gelschicht zunächst getestet werden.
- Ein Laser-Ablationssystem (LA) wird derzeit im Kontrollbereich des INE installiert und mit der ICP-MS gekoppelt und steht somit für die ortsaufgelöste RN-Analyse des LIT Experiments zur Verfügung.
- Die begleitende Analytik (geochemisches und Kolloid- Monitoring und RN- Messungen) zur Analyse erster Proben des i-BET Experiments (Studie des Erosionsverhaltens von Bentonit (MX-80) bei hohem Kompaktierungsgrad) wurde fortgeführt.
- Erste Diskussionen zur Probenahmestrategie wurden innerhalb des CFM Konsortiums geführt.
- AP2.1: Die thermodynamischen Simulationsrechnungen innerhalb von KOLLORADO-e2 sind in Form eines Manuskripts zu den deutschen Aktivitäten zusammengefasst. Die im Rahmen des von GRS/KIT organisierten internationalen „CFM Workshop on thermodynamic benchmark calculations“ wurden weitestgehend in eine vergleichbare Datenmatrix überführt.
- AP3: Ein erstes Arbeitstreffen wurde in Karlsruhe zur Abstimmung der Arbeiten zwischen KIT, FSU und GRS durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1+2: Momentan werden geeignete Kandidaten zur Besetzung der Stellen für die geplanten Arbeiten in AP1+2 gesucht. Nach Besetzung der Stellen werden erste Tests zur Untersuchung mittels LA-ICP-MS an den inaktiven Mock-up Tests speziell zur Probenvorbereitung gefahren.
- Die Einreichung der Publikation (aus KOLLORADO-e2) in Zusammenarbeit mit der GRS zu den Speziations- und Löslichkeitsberechnungen in Bentonit- und Grimselgrundwässern, welche u. a. unterstützend zur Interpretation der Ergebnisse der LIT-Experimente herangezogen werden kann, ist geplant. Weiterhin wird ein Manuskript vorbereitet zur Veröffentlichung der Daten der Benchmark-Kalkulation des CFM Konsortiums.
- AP3: CFM Partner Meeting und Kick-Off Meeting.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Rinderknecht, Noseck, Schäfer: Integrity of the bentonite barrier for the retention of radionuclides in crystalline host rock - experiments and modeling - (Project KOLLORADO-e2; Final report); KIT scientific report 7757. KIT, Karlsruhe, 2019 (in prep.)

Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		Förderkennzeichen: 02 E 11759C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 4: Sicherheitsnachweis		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2019 bis 30.04.2022	Berichtszeitraum: 01.05.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 291.340,00 EUR	Projektleiter: Dr. Noseck	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Das experimentelle Programm im Labor und im Untertagelabor Grimsel unter Anwendung von spektroskopischen und mikroskopischen Methoden der Partner FSU und KIT-INE soll dazu beitragen, ein verbessertes mechanistisches Verständnis der Integrität der Bentonitbarriere und des kolloidgetragenen RN-Transports zu erreichen. Es soll die Übertragbarkeit der Labordaten auf natürliche Systeme überprüft und Eingangsdaten für die in der Langzeitsicherheitsanalyse von GRS verwendeten Codes CLAYPOS, COFRAME und d³f++ ermittelt werden. Diese Codes sowie von KIT-INE und FSU genutzte gekoppelte reaktive Transportmodelle werden zur Beschreibung der Feldexperimente weiterentwickelt, angewandt und damit weiter qualifiziert.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Weiterführen der Auswertung der Rechnungen zum thermodynamischen Benchmark inklusive zu den Antworten des Fragebogens und Formulierung konkreter Fragen an die Teilnehmer zur Vorbereitung einer Veröffentlichung.
- AP3: Durchführung eines ersten Arbeitstreffens in Karlsruhe zur Abstimmung der Arbeiten zwischen KIT, FSU und GRS.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Vorbereitung einer Veröffentlichung zum ersten Teil des thermodynamischen Benchmarks mit den Ergebnissen aller Teilnehmer.
Erarbeitung eines Konzepts für den zweiten Teil des thermodynamischen Benchmarks mit Einbeziehung von Ionenaustausch und Oberflächenkomplexierung an Mineralphasen des Bentonits und des kristallinen Wirtsgesteins im Nahbereich des LIT-Experiments.
Nach Vorliegen experimenteller Ergebnisse aus der Überbohrung des LIT Experiments Vergleich mit Vorhersagerechnungen zur Diffusion im Bentonit und ggf. Modifikation der Rechnungen entsprechend beobachteter Parameter.
Durchführung von Vorhersagerechnungen für ein weiteres Dipol-Migrationsexperiment zur Untersuchung der Sorptions-/Redoxkinetik, sobald Daten aus Dipoltests mit einem nicht-sorbierenden Tracer verfügbar sind.
- AP3: Durchführung eines CFM Partner Meeting und Kick-Off Meeting.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestr. 6, 09599 Freiberg		Förderkennzeichen: 02 E 11769A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2019 bis 31.10.2021	Berichtszeitraum: 01.05.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.409.542,00 EUR	Projektleiter: Dr. Gruner	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Selektiver Rückbau des Funktionsbauwerkes GV2.

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Druckbeaufschlagung des GV2 über die Druckkammer wurde abgeschlossen (maximaler Flüssigkeitsdruck 28 bar). Die Ortsbrust ist beräumt worden und die technischen Vorbereitungen für die Bohrarbeiten und den anschließenden selektiven Rückbau sind abgeschlossen.
- AP2: Laborversuche zur Reproduzierbarkeit der Rezeptur des MgO-Spritzbetons aus dem Bauwerk GV2. Es wurden aktuelle MgO-Sorten der Firma Styromag getestet. An Stelle der früher benutzten R-Lösung aus der Grube Teutschenthal wird jetzt als Anmachlösung eine handelsübliche MgCl₂-Lösung verwendet.
Die neu beschaffte Spritzbetonmaschine für Technikumsversuche wurde getestet und in Betrieb genommen.
- AP3: Noch keine Arbeiten.
- AP4: Noch keine Arbeiten.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Überbohren der Saumzone um die mit Lösung beaufschlagten Bohrungen B38, B39, B40 und B41. Auswahl von Probematerial für repräsentative Untersuchungen zum Verhalten der Betonierabschnittsgrenzen unter Lösungseinwirkung. Verifizierung der radialen Eindringtiefe der Lösung in den Spritzbeton während der Langzeitbohrlochversuche im Vorhaben MgO-SEAL. Zusätzliche axiale Kernbohrungen im MgO-Spritzbeton. Freischnitt des rechten Teils der Mantelfläche des Spritzbetonpfropfens. Anschließend wird die Kontur des MgO-Spritzbetons manuell freigelegt und deren Zustand begutachtet.
- AP2: Laborversuche bei unterschiedlichen Masseverhältnissen Zuschlag:MgO für konventionellen Hartgesteinszuschlag und für Steinsalzgrus unterschiedlicher Kornverteilung.
- AP3: Untersuchungen zur Frühfestigkeit des MgO-Spritzbetons.
- AP4: Noch keine Arbeiten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 E 11769B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2019 bis 31.10.2021		Berichtszeitraum: 01.05.2019 bis 30.06.2019
Gesamtkosten des Vorhabens: 168.309,00 EUR		Projektleiter: Dr. Kulenkampff

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Selektiver Rückbau des Funktionsbauwerkes GV2.

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

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1/3: Vorbereitung: Konstruktion einer Versuchszelle für Langzeit-Transportuntersuchungen. μ CT-Testmessungen und Entwicklung einer geeigneten Visualisierungs- und Auswerteprozedur.

AP2: keine eigenen Arbeiten im Teilprojekt.

AP3: Noch keine Arbeiten

AP4: Noch keine Arbeiten

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1/3: Herstellung der Versuchszelle und Testmessungen.

AP2: keine eigenen Arbeiten im Teilprojekt.

AP3: Untersuchungen zur Frühfestigkeit des MgO-Spritzbetons

AP4: Noch keine Arbeiten

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin		Förderkennzeichen: 02 E 11779
Vorhabensbezeichnung: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz, Qualitätssicherung mit Ultraschall (MgO-S3)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 3: Endlagerkonzepte + Endlagertechnik, Feld 3.3		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2019 bis 31.10.2021	Berichtszeitraum: 01.05.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 14.816,00 EUR	Projektleiter: Dr. Niederleithinger	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Dieses Vorhaben wird in Nachfolge des Vorhabens „MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl₂-Lösung (MgO-SEAL)“ (Förderkennzeichen: 02E11435, 01.10.2015 - 30.04.2019) und im Verbund mit „Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A“ (Förderkennzeichen: 02E11769A) durchgeführt.

Das Verbundvorhaben soll belegen, dass beim Angriff von MgCl₂-haltiger gesättigter NaCl-Lösung auf dem MgO-Spritzbeton, die Phasenumwandlung der 5-1-8-Phase in die thermodynamisch stabile 3-1-8-Phase zu einer Reduzierung der Permeabilität führt. Dazu sollen Proben aus dem MgO-Spritzbeton untersucht werden, die ausreichend lange unter Einwirkung der Lösung standen. Diese Proben sollen sowohl aus den Langzeitbohrlochversuchen im MgO-Spritzbetonbauwerk GV2 als auch durch dessen partiellen Rückbau gewonnen werden.

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die BAM hat Anteile in folgenden Arbeitspaketen des Verbundprojekts

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Dem Ablaufplan des Verbundvorhabens gemäß hat zum Berichtszeitpunkt keines der aufgelisteten Unterarbeitspakete begonnen.

Bisher wurden daher plangemäß keine Arbeiten durchgeführt. Ein BAM-Mitarbeiter hat an der ersten Projektsitzung des Verbundvorhabens teilgenommen, um die zukünftige Zusammenarbeit zu koordinieren. Die Durchführung von Ultraschalluntersuchungen und die Vorbereitung der entsprechenden Dokumentation sollten erst im Haushaltsjahr 2020 anfangen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Zur Verifizierung früherer Untersuchungen und zur Identifikation von einzelnen Homogenbereichen, die nachfolgend untersucht werden sollen, werden vor bzw. nach der Auffahrung eines Hohlraums systematisch zerstörungsfreie Ultraschalluntersuchungen von der Luftseite sowie vom seitlichen Aufschluss her durchgeführt.

Der MgO-Spritzbeton wird durch Ultraschall-Anwendungen charakterisiert, inklusiv Untersuchungen zur Bestimmung von Ultraschall-Materialparametern, Identifikation von Fehlstellen und die Ableitung von möglichen Parametern für eine Qualitätsüberwachung. Vorschläge für die Qualitätssicherung bzw. -dokumentation von Ultraschalluntersuchungen werden auch vorbereitet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e. V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg		Förderkennzeichen: 02 E 11789
Vorhabensbezeichnung: Wegemanagement bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland (WERA)		
Zuordnung zum FuE-Förderkonzept: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle Bereich 5: Wissensmanagement und sozio-technische Fragestellungen, Feld 5.1		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2019 bis 30.11.2020	Berichtszeitraum: 01.06.2019 bis 30.06.2019	
Gesamtkosten des Vorhabens: 312.050,42 EUR	Projektleiter: Dr. Chaudry	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Projekt wird dabei in vier Arbeitspakete gegliedert:

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

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Mit Projektbeginn am 1. Juni 2019 wurden die Arbeiten am Forschungsvorhaben WERA aufgenommen. Der Zeitplan gemäß Abb. 8-1 der Vorhabenbeschreibung wurde unter Berücksichtigung des späteren Projektstarts am 1.6.2019 angepasst. Erste Entwürfe zur Strukturierung des Baukastens zur Beschreibung von Optionen des Entsorgungsmanagements wurden angefertigt. Grundzüge einer hierarchischen Gliederung der Bausteine wurden zwischen dem Öko-Institut und dem Unterauftragnehmer abgestimmt. Der gemeinsame Auftaktworkshop wurde vom Öko-Institut inhaltlich vorbereitet.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Berichtszeitraum 2/2019 sind gemäß dem Projektzeitplan folgende Arbeiten geplant:

- Fortführung und Abschluss der Arbeiten zu AP1
- Entscheidung über die Einbeziehung externer Expertise gemäß Punkt 6.1 der Vorhabenbeschreibung
- Aufnahme der Arbeiten zu AP2
- Grundsätzliche Vorüberlegungen zum in AP4 vorgesehenen Stakeholder-Workshop

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 | 114 |
| 02 E 11779 | MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz, Qualitätssicherung mit Ultraschall (MgO-S3) | 204 |
| 1501509 | Langzeitverhalten von Metall- und Elastomerdichtungen sowie Polyethylen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (LaMEP) | 20 |
| 1501561 | Entwicklung eines bruchmechanischen Berechnungsansatzes zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Brennstabhüllrohren bei längerfristiger Zwischenlagerung - KEK | 34 |

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 | 48 |
| 02 E 11385 | Entwicklung von Monitoring-Konzepten in Anlehnung an Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowie Ableitung von Entscheidungsgrößen und Reaktionsoptionen (MONTANARA) | 64 |
| 02 E 11486B | Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt B | 106 |
| 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 | 112 |
| 02 E 11577A | Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt A | 128 |
| 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 | 144 |
| 02 E 11658B | Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt B | 160 |

- 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)  168
- 02 E 11708B** Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt B  176
- 02 E 11718A** Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt A  182
- 02 E 11728** Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus einem HAW-Endlager in Kristallgestein (KOREKT)  186
- 02 E 11749** Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (TREND)  192

DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45307 Essen

- 02 E 11718B** Verbundprojekt: Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein (AGEnT), Teilprojekt B  184

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  84

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  142

Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27 c, 80686 München

- 1501576** ProCast - Probalistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen  36

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  120

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena

- 02 E 11759A** Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt A  194

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Schwertner- gasse 1, 50667 Köln

02 E 11284	Bentonitaufsättigung in geotechnischen Barrieren im Endlager-Nahfeld (BIGBEN)	50
02 E 11304	Tonforschung im Untertagelabor Mont-Terri	52
02 E 11314	Ermittlung der Stabilitätsbandbreiten redoxdeterminierender eisenhaltiger Korrosionsphasen (KORPHA)	54
02 E 11344A	Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren; Teilprojekt A	58
02 E 11365	Lösungsverhalten von Spalt- und Aktivierungsprodukten im Nahfeld eines Endlagers (LÖVE)	62
02 E 11456B	Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e ²), Teilprojekt B	96
02 E 11466	Entwicklung von Rechenmodulen für die integrierte Modellierung von Transportprozessen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (RepoTREND+)	98
02 E 11476A	Verbundprojekt: Grundwasserströmung und Stofftransport in komplexen realen Systemen (GRUSS), Teilprojekt A	100
02 E 11486A	Verbundprojekt: Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und der Langzeitsicherheit (BASEL), Teilprojekt A	104
02 E 11496A	Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt A	108
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	126
02 E 11577B	Verbundprojekt: Sicherheitsanalytische Untersuchungen zu Endlagersystemen im Kristallin (SUSE), Teilprojekt B	130
02 E 11587B	Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt B	134
02 E 11607A	Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt A	136
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	146
02 E 11627	Arteigene Versatz- und Verschlussmaterialien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tonformationen (AVET)	148

- 02 E 11647** Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (WiGru 8)  156
- 02 E 11658A** Verbundprojekt: Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland (ANSICHT II), Teilprojekt A  158
- 02 E 11668A** Verbundprojekt: Smart-K_d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt A  162
- 02 E 11698** Untersuchung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemischer Einwirkungen auf zementbasierte Dichtelemente (THYMECZ)  172
- 02 E 11708A** Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt A  174
- 02 E 11759C** Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO-e3), Teilprojekt C  198
- RS1552** Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung  38
- RS1553A** Verbundvorhaben: Methodik zur zuverlässigkeitsorientierten Nachrechnung und Bewertung bestehender Bauwerke mit verlängerter Nutzungsdauer – Teilprojekt: Methodik zur probabilistischen Bewertung („ProbBau“)  40
- RS1563** Berücksichtigung der Alterung von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton bei Berechnungen zur Tragfähigkeit, insbesondere von Zwischenlagern  42

<p>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden</p>

- 02 E 11334B** Verbundprojekt EDUKEM: Entwicklung und Durchführung experimenteller Methoden zur verbesserten Modellierbarkeit uranhaltiger salinärer Lösungen; Teilprojekt B  56
- 02 E 11415B** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt B  68
- 02 E 11607B** Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt B  138
- 02 E 11668B** Verbundprojekt: Smart-K_d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt B  164
- 02 E 11748B** Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt B  190
- 02 E 11769B** Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt B  202

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 📖 152

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 📖 26

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 📖 86
- 02 E 11708C Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt C 📖 178

Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstraße 21, 55122 Mainz

- 02 E 11415A Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt A 📖 66

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 📖 102

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

- 02 E 11587A Verbundprojekt: Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip - Vorprojekt (SANDWICH-VP), Teilprojekt A 📖 132
- 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 📖 154

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 📖 88
- 1501560 Modellierung und Untersuchung der Degradation von Hüllrohrmaterialien aus Zr-Legierungen durch Hydridbildungs- und Hydridverteilungsprozesse im Hinblick auf die Langzeitzwischenlagerung (KEK) 📖 32

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 📖 116

- 02 E 11789 Wegemanagement bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland (WERA)  206

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg

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

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  70
- 02 E 11547B Verbundprojekt: Konzepte und Maßnahmen zum Umgang mit soziotechnischen Herausforderungen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle (SOTEC-radio), Teilprojekt B  118
- 02 E 11456A Verbundprojekt: Integrität der Bentonitbarriere zur Rückhaltung von Radionukliden in kristallinen Wirtsgesteinen - Experimente und Modellierung (KOLLORADO- e^2), Teilprojekt A  94
- 02 E 11496B Verbundprojekt: Korrosions- und Sorptionsprozesse an Stahloberflächen bei hohen Temperaturen und Drücken im anaeroben salinaren Milieu (KORSO), Teilprojekt B  110
- 02 E 11607C Verbundprojekt: Verhalten langlebiger Spalt- und Aktivierungsprodukte im Nahfeld von Endlagern unterschiedlicher Wirtsgesteine und Möglichkeiten ihrer Rückhaltung (VESPA II), Teilprojekt C  140
- 02 E 11668C Verbundprojekt: Smart- K_d in der Langzeitsicherheitsanalyse - Anwendungen (SMILE), Teilprojekt C  166
- 02 E 11759B Verbundprojekt: Grimsel Felslabor: In-situ-Experimente zur Bentonit Langzeit-Stabilität und der Radionuklidmobilität an der Grenzfläche Bentonit - Kristallin (KOLLORADO- $e3$), Teilprojekt B  196

Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestraße 6, 09599 Freiberg

- 02 E 11193A Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA – Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen  46
- 02 E 11435 MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von $MgCl_2$ -Lösung (MgO-SEAL)  82
- 02 E 11557 Gefügestabilisierter Salzgrusversatz - Phase 2 (GESAV II)  122
- 02 E 11769A Verbundprojekt: MgO-Spritzbeton für Streckenverschlüsse für HAW-Endlager im Steinsalz (MgO-S3), Teilprojekt A  200

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  90

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

- | | | |
|--------------------|---|-------|
| 02 E 11446E | Verbundprojekt: Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS), Teilprojekt E | 📖 92 |
| 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 | 📖 124 |
| 02 E 11688 | Langzeitsicheres Abdichtungselement aus Salzschnittblöcken - Durchführung, Auswertung und Reanalyse von THM-Versuchen (Salzschnittblöcke III) | 📖 170 |
| 02 E 11708D | Verbundprojekt: Kompaktion von Salzgrus für den sicheren Einschluss (KOMPASS), Teilprojekt D | 📖 180 |
| 02 E 11748A | Verbundprojekt: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches - Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, In-situ-Versuche (STROEFUN III), Teilprojekt A | 📖 188 |

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 | 📖 150 |
|--------------------|--|-------|

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

- | | | |
|--------------------|---|------|
| 02 E 11415G | Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt G | 📖 78 |
| 1501510 | Struktur-Eigenschafts-Funktionsbeziehungen von Elastomerdichtungswerkstoffen als sicherheitsrelevante Komponenten von Transport- und Lagerbehältern für radioaktive Stoffe (StrukElast) | 📖 22 |
| 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 | 📖 24 |

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 | 📖 28 |
|-----------------|--|------|

- 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  30

Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München

- 02 E 11344D** Verbundprojekt UMB: Umwandlungsmechanismen in Bentonitbarrieren, Teilprojekt D  60

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

Universität des Saarlandes, Campus Saarbrücken, 66123 Saarbrücken

- 02 E 11415D** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt D  72

Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam

- 02 E 11415F** Verbundprojekt: Geochemische Radionuklidrückhaltung an Zementalterationsphasen (GRaZ), Teilprojekt F  76