

PROJEKT VIRTUS

VIRTUELLES UNTERTAGELABOR IM SALZ

Dipl.-Geophys Tilmann Rothfuchs (GRS), Dipl.-Ing. Steffen Masik (IFF), Dipl.-Geol. Joachim Behlau (BGR), Dipl.-Geophys. Michael Jobmann (DBE TEC)

1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Alle Länder, in denen Kernkraftwerke zur Stromproduktion betrieben werden, verfolgen zur Entsorgung von dabei entstehenden hochradioaktiven Abfällen gemäß internationalem Konsens [1] Konzepte der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Als mögliche Wirtsgesteine, die zur Aufnahme eines Endlagers geeignet sind, werden in Deutschland in erster Linie Salz und Tonformationen betrachtet.

Um für die Errichtung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen notwendige Erfahrungen zu erlangen, bzw. um hinreichende Kenntnisse über das Verhalten des Wirtsgesteins zu erwerben, werden in einigen Ländern nach Empfehlungen der OECD-Nuclear Energy Agency (NEA) [2] Untertagelabors (engl. Underground Research Laboratory (URL)) betrieben. Deutschland betreibt derzeit kein eigenes Untertagelabor und im Wirtsgestein Salz wird derzeit auch andernorts kein Untertagelabor betrieben. Um dem forschenden Wissenschaftler und dem Endlagerbetreiber dennoch ein leistungsfähiges Instrument zur Bewertung der in einem Endlager ablaufenden Prozesse und zur Erprobung von Endlagerkonzepten bereit zu stellen, wurde die Idee eines virtuellen Untertagelabors entwickelt.

Mit einer entsprechenden Software soll den an Endlagerprojekten beteiligten Institutionen ein Instrument an die Hand gegeben werden, mit welchem einerseits die in einem Untertagelabor bzw. Endlager ablaufenden sehr komplexen sicherheitsrelevanten Prozesse in den geologischen Strukturen analysiert und anschaulich visualisiert werden können und andererseits eine schnelle und effektive Planung und Prüfung von Endlagerauslegungen in den (ggf. komplizierten) geologischen Strukturen möglich ist.

Die anschauliche Visualisierung der Ergebnisse numerischer Simulationen in den dreidimensionalen geologischen Strukturen eines Endlagers soll sowohl dem forschenden Wissenschaftler als auch der interessierten Öffentlichkeit helfen, die komplexen Prozessabläufe in einem Endlager besser verstehen und bewerten zu können.

Nach über dreißig Jahren Endlagerforschung liegt zudem ein umfangreiches Know-How der Untertageforschung im Steinsalz vor, das aufgrund des altersbedingten Ausscheidens vieler beteiligter Wissenschaftler verloren zu gehen droht. Das Projekt VIRTUS soll deshalb auch dazu beitragen,

die wichtigsten Ergebnisse aus 30 Jahren Untertageforschung aufzuarbeiten, zu konsolidieren und in einer Datenbank zu dokumentieren. Die für numerische Simulationen des virtuellen Untertagelabors benötigten thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Parameterdaten sollen in Form einer qualitätsgesicherten Datenbasis bereit gestellt werden.

Kurzgefasst lauten die Projektziele:

- Entwicklung der Komponenten/Instrumente eines Virtuellen Untertagelabors/Endlagersystems im Steinsalz zur Visualisierung und Interpretation der Ergebnisse numerischer Simulationen ,
- Bereitstellung einer konsolidierten qualitätsgesicherten THM-Datenbasis für numerische URL- und Endlager-simulationen,
- Prototypische Modellierung ausgewählter URL- und Endlagerkonfigurationen mit bestimmten, zum Einsatz kommenden Process-Level-Codes (PLC),
- Ableitung filmischer Darstellungen für die Öffentlichkeitsarbeit.

Die grundsätzliche Entscheidung zur Durchführung des Projektes wurde nach einem Vorprojekt [3] und eingehender Erörterung der Projektziele im Oktober 2010 vom "Projektträger Karlsruhe für Entsorgung und Wassertechnologie (PTKA-WTE)" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) mit dem Projektstart am 1. November 2010 getroffen.

2 Partnerschaft und Aufgabenverteilung

Zur Durchführung des Projekts war ein Konsortium zusammenzuführen, das in der Lage sein sollte, die anspruchsvollen Projektziele in angemessener Zeit zu realisieren und das angestrebte Instrument VIRTUS den an der Endlagerforschung in Deutschland beteiligten Institutionen als modernes Analyse- und Planungsinstrument zeitnah zur Verfügung zu stellen.

Neben dem GRS-Bereich Endlagersicherheitsforschung mit langjährigen Kompetenzen im Bereich der Prozess- und Sicherheitsanalyse wurden auf Wunsch des BMWi die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) für

die geologischen Kompetenzen und die DBE Technology GmbH (DBE TEC) für die endlagerbautechnischen Kompetenzen als Projektpartner gewonnen.

Auf der Grundlage einer umfangreichen Marktanalyse im Hinblick auf eine zügige Realisierung der verschiedenen softwaretechnischen Aspekte, insbesondere der anspruchsvollen Visualisierungssoftware, wurde das Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) als kompetenter Software-Entwickler über einen Unterauftrag der GRS hinzugezogen.

Mitglieder des Projektteams sind somit die GRS, die BGR, die DBE TEC und das Fraunhofer IFF mit nachfolgender Aufgabenverteilung:

- Projektleitung und Einbindung des kompetenten Software-Entwicklers IFF im Unterauftragsverfahren (GRS)
- Projektkonzipierung und Erstellung eines Pflichtenheftes (GRS/IFF, BGR, DBE TEC)
- Bereitstellung der erforderlichen geologischen Modelle (BGR)
- Bereitstellung der erforderlichen Daten für URL- und Endlagergrubengebäude (DBE TEC)
- Dokumentation der Ergebnisse der mehr als dreißigjährigen Forschung in Untertagelabors mit Bereitstellung einer qualitätsgesicherten Datenbasis (GRS, BGR, DBE TEC)
- Entwicklung der zugehörigen Datenbanken (GRS, IFF)
- Bereitstellung der VIRTUS-Software (IFF) und Betrieb des Servers für internetbasierten Zugriff auf die VIRTUS-Datenbanken (GRS)
- Process-Level-Modellierung von Leitexperimenten (BGR, DBE TEC, GRS)

3 Die zwei Säulen des Projekts VIRTUS

Die wesentlichen Säulen des Projekts bestehen also in der

- Erstellung der Software-Plattform VIRTUS für die anschauliche Visualisierung von Endlager-relevanten Prozessen

und in der

- Durchführung numerischer Simulationen von Experimenten in einem Untertagelabor und/oder von Prozessabläufen in einem Endlager auf Grundlage eines hochauflösenden geologischen Lagerstättenmodells sowie eines komplexen 3D-Grubengebäudes.

Da das Projekt im Juni 2012 erst die Hälfte seiner Laufzeit erreicht hat, kann im Nachfolgenden nur der bisher erzielte Stand hinsichtlich Planung und Entwicklung der VIRTUS-Software-Plattform dargelegt werden. Ergebnisse zur numerischen Simulationen von Leitexperimenten werden erst zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar sein, wenn die Bereitstellung der konsolidierten Datenbasis abgeschlossen ist. Die im Rahmen einer Vorstudie vorgenommenen Visualisierungen eines virtuellen Fluges durch ein Untertagelabor sowie die Ergebnisse der Modellierung eines zeitlich und räumlich veränderlichen Temperaturfeldes um eine Einlagerungsstrecke mit Wärme freisetzenden hochradioaktiven Abfällen werden allerdings während des Vortrages in einem Video zur Verdeutlichung der Projektziele dargestellt werden.

4 Anforderungen bzw. Features der Software-Plattform

Die Software-Plattform VIRTUS soll nach der zu Projektbeginn durchgeführten Anforderungsanalyse in der Endversion die nachfolgenden Features aufweisen:

- Import komplexer geologischer 3D-Modelle aus der von BGR verwendeten Software openGEO [3] und von Grubengebäuden (von DBE TEC) sowie Speicherung des 3D-Gesamtmodells des Untertagelabors.

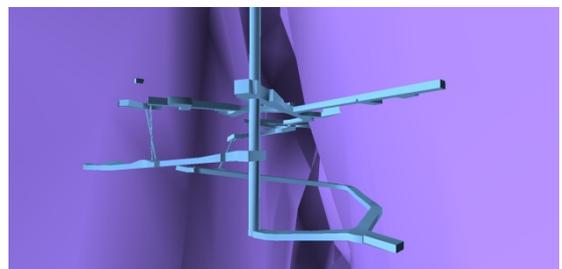


Abbildung 1: Importierte 3D-Geologie (siehe auch Abb. 8) mit Grubengebäude

- Interaktive Visualisierung des Untertagelabors und seines Umfelds wie Virtuelle Rundflüge, freie Navigation, Betrachtung aus unterschiedlichen Blickwinkeln, Einblenden/Ausblenden von Objekten (Transparenzen), Legen/Betrachten von Schnittebenen

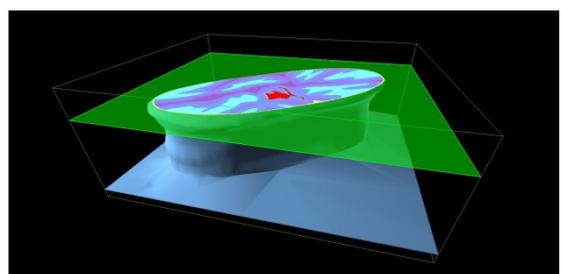


Abbildung 2: Geologisches 3D-Modell eines virtuellen Salzstocks (horizontal angeschnitten im Vortrag als Video)

- Editieren des 3D-Modells des Untertagelabors, wie Hinzufügen/Entfernen/Verschieben von Endlagerhohlräumen (Kammern, Strecken, Bohrlöcher), Zuordnung von Materialien zu Strukturen wie z. B. geotechnische Barrieren, Abfallbehälter etc., Zuordnung von Materialindizes
- Extraktion von Materialparametern aus der Datenbank und Generierung der Eingabedaten für die zum Einsatz kommenden PLCs, wie z. B. Code_Bright, Jife, FLAC. Ausgabe der Eingabedaten über eine geeignete Schnittstelle zu den PLCs.
- Auswahl des zu simulierenden Bereichs aus dem Gesamtmodell des Untertagelabors, (Quaderselektion)

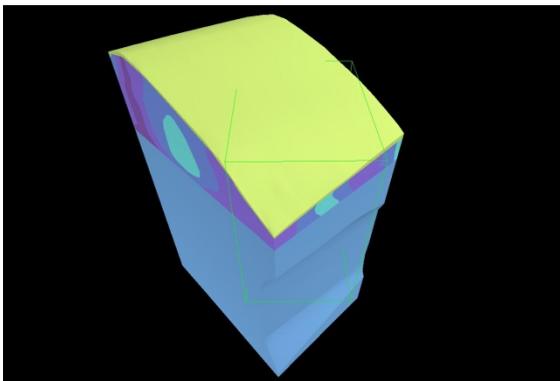


Abbildung 3: Selektion eines Ausschnittes (grünes Rechteck)

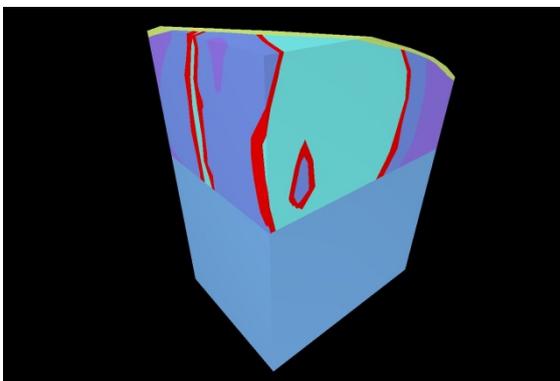


Abbildung 4: Ausgeschnittener Bereich

- Starten der virtuellen URL-Experimente über die simulierenden PLCs
- Import von Simulationsergebnissen aus den PLCs und Postprocessing
- Auswahl, welche der Simulationsergebnisse dargestellt werden sollen, z.B. Temperaturen, Spannungen, Drücke, Veränderungen der Hohlräume, Ausbreitung von Schadstoffen
- Visualisierung von Simulationsergebnissen

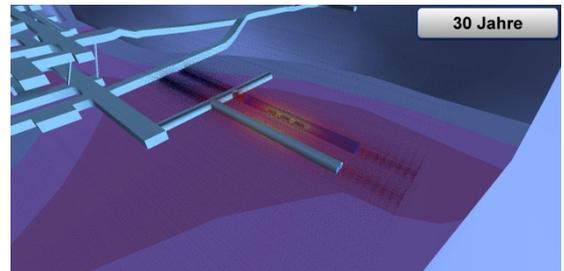


Abbildung 5: Visualisierung von Simulationsergebnissen, z. B. Temperaturverteilung dargestellt als Punktwolke

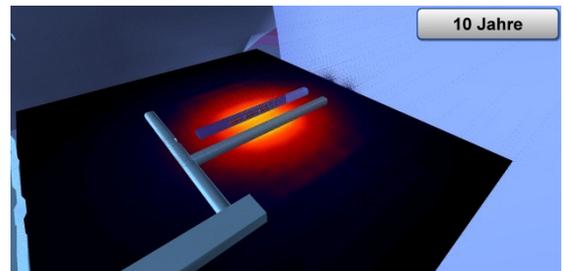


Abbildung 6: Temperaturverteilung; dargestellt als Schnitt

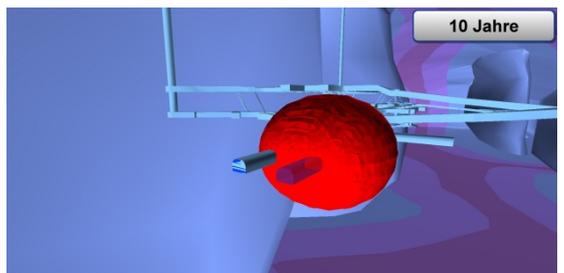


Abbildung 7: Temperaturverteilung, dargestellt als Iso-Fläche

- Einblenden zugehöriger Dokumente zu aktuellen URL-Experimenten sowie wahlweise zu früheren URL-Experimenten
- Bereitstellung einer Schnittstelle zur Ausgabe von Daten für die Erstellung ansprechender filmischer Darstellungen für die Öffentlichkeitsarbeit
- Weitere Aspekte
Entwicklung eines User Interfaces, Integration eines Rechtesystems, um Zugriffe auf das virtuelle Untertagelabor einschränken zu können (Betrachter, Administrator), Betriebssystemunabhängigkeit

5 Geologische Modelle

Von BGR werden stationäre geologisch-tektonische 3D-Lagerstättenmodelle verwendet, um Ergebnisse der geologischen Erkundung integral auszuwerten [4]. Dazu dient das Programm openGEO. Die BGR ist einer der Hauptnutzer von openGEO und hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Weiterentwicklung des Programms. Durch

spezielle Rechte ist die nachhaltige Nutzung, auch über viele Jahre, wie in der Endlagerung notwendig, gesichert.

Auf Grund der Arbeitsweise auf horizontalen und vertikalen Konstruktionsebenen, die vergleichbar mit geologischen Karten und Profilen sind, und der speziell entwickelten liniengeführten Triangulation werden komplexe Modelle erstellt (Abb. 8). Sie können die in der Salzgeologie vorkommenden komplexen Strukturen wie polyphase überkippte Fließfaltungen auf engstem Raum, komplizierte Tektonik und Bruchstrukturen (z. B. Scheitelgrabensysteme über Salzstöcken, komplizierte Störungssysteme in Magmatiten) sowie quartärgeologische Besonderheiten, wie z.B. Rinnen exakt und aufschlussstreu abbilden.

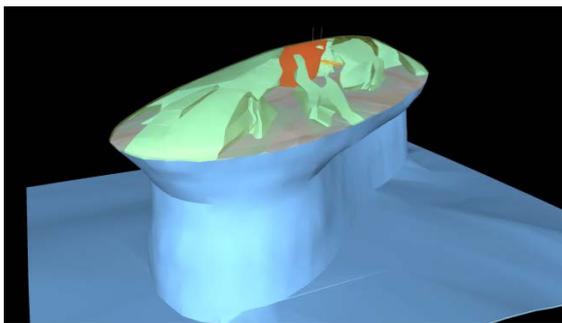


Abbildung 8: Mit openGEO erstelltes geologisches 3D-Modell eines virtuellen Salzstocks

openGEO erlaubt auch eine Koppelung von Strukturmodellen unterschiedlichster Auflösung und thematischen Inhalts, z. B. ein regionaltektonisches Tiefenmodell mit mehreren salzstockinternen geologischen Modellen. Diese können wieder mit hydrogeologischen Modellen und Referenzmodellen wie die Süßwasser/Salzwasser-Grenzfläche zu einem Gesamtmodell gekoppelt werden. Die Bearbeitung in openGEO ist völlig gesteins- und themenunabhängig. In openGEO können beliebige Grunddaten wie Kartierungen, Karten, Geländemodelle, Bohrkernaufnahmen, geophysikalische Logs, Seismik, Grids eingelesen und auf Konsistenz geprüft werden.

Das mit openGEO verbundene Programm GEOravis dient der Koppelung von externen Datenbanken mit dem 3D-Modell. Die dann möglichen SQL-Abfragen können eine Verknüpfung von beliebigen Sachverhalten aus dem 3D-Modell und den Datenbankinhalten herstellen. So können z. B. chemische Analysen oder mikroakustische Ereignisse im 3D-Modell nach Herkunft oder zeitlicher Entwicklung ausgewertet werden.

Zurzeit wird openGEO in der BGR für endlagerrelevante Arbeiten, für hydrogeologische Arbeiten im Rahmen der Endlagerung, im Rahmen von Forschungsverbundaufgaben für Altbergbau oder Energiespeicher und in der Zusammenarbeit mit der Kavernenindustrie verwendet. Die mit openGEO erstellten 3D-Modelle dienen im Zuge von Standorterkundungen zur Auswertung der Erkundungsdaten und als

Planungsinstrument z. B. für bergbauliche Maßnahmen sowie als Grundlage für numerische Modellberechnungen und für Arbeiten im Rahmen von Planfeststellungsverfahren.

6 VIRTUS-Architektur

Das VIRTUS-Architekturkonzept sieht vor, das VIRTUS-Gesamtsystem in zwei wesentliche Komponenten zu unterteilen, ein lokales Softwaresystem und einen zentralen Server. Abbildung 9 gibt einen Überblick über das Konzept. Die Aufgabe des Servers ist die Bereitstellung aller VIRTUS relevanten Daten. Hierzu zählen die konsolidierte Datenbasis (geologische Modelle, THM-Daten) und die Sammlung relevanter Literatur, aber auch die unter Verwendung der VIRTUS-Benutzeroberfläche erstellten Projekte. Weiterhin wird eine Nutzerverwaltung realisiert, um ausschließlich berechtigten Personen und Institutionen Zugang zur VIRTUS-Datenbasis zu gewähren.

Neben dem zentralen Server wurde die eigentliche VIRTUS-Benutzeroberfläche als lokale Anwendung konzipiert. Sie ermöglicht es den Nutzern, Projekte erstellen sowie Projektdaten betrachten, hinzufügen und bearbeiten zu können.

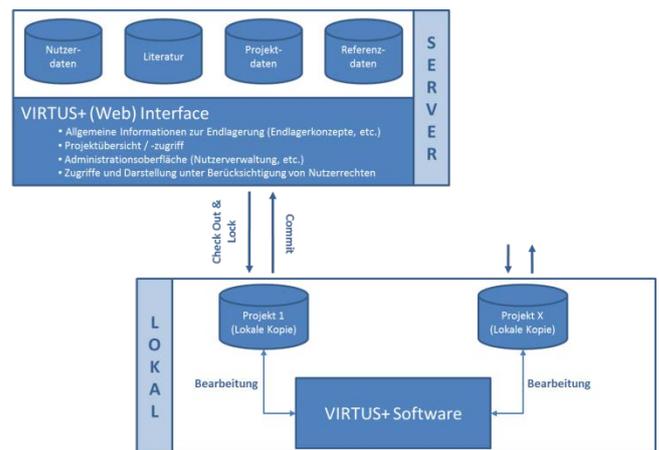


Abbildung 9: VIRTUS-Architekturkonzept.

7 VIRTUS-Datenhaltung

Die VIRTUS-Nutzerverwaltung erlaubt die Konfiguration von Zugriffsrechten unterschiedlicher Nutzer und Nutzergruppen auf zentrale Ressourcen wie z. B. die Referenzdatenbank sowie auf lokale Anwendungen wie die VIRTUS-Benutzeroberfläche und die VIRTUS-Administrationswerkzeuge.

Wie Abbildung 10 entnommen werden kann, unterscheidet die VIRTUS-Datenverwaltung zwischen Referenzdaten (konsolidierte THM-Datenbasis und geologische Modelle) und individuellen Projekt- bzw. Experimentdaten.

Die Referenzdaten sind nur über die VIRTUS-Administrationswerkzeuge mit entsprechenden Nutzerrechten veränderbar. Sie können aber von jedem VIRTUS Nutzer instanziiert und einem Projekt zugewiesen werden. Eine Änderung der Referenzdaten ändert nicht die bereits existierenden Instanzen, sondern legt eine neue Instanz an. Da die Referenzdaten zentral abgelegt sind, können sie nur über eine aktive Netzwerkverbindung abgerufen werden. Nach ihrer Instanziierung sind sie im Rahmen der Projektdaten auch lokal verfügbar.

Auch Projektdaten werden zentral gespeichert, müssen aber, um ein VIRTUS-Projekt verändern bzw. nutzen zu können, vollständig oder teilweise ausgecheckt, also heruntergeladen und lokal verfügbar gemacht werden. Ein- bzw. Auschecken unterliegt dem VIRTUS-Nutzer- und Versionsmanagement.

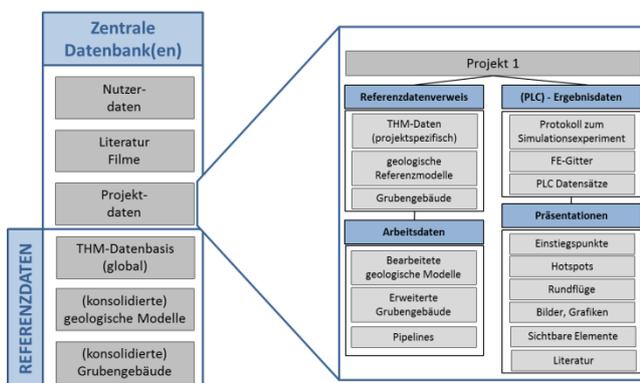


Abbildung 10: Konzept der VIRTUS-Datenhaltung

8 Zusammenfassung

Die Software-Plattform VIRTUS (Virtuelles Untertagelabor im Salz) wird gegenwärtig im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Verbundprojektes entwickelt. Mit VIRTUS soll den an der Endlagerforschung beteiligten Institutionen ein leistungsstarkes Instrument an die Hand gegeben werden, mit dem die in einem Endlager bzw. Untertagelabor ablaufenden Prozesse unter Einbindung speziell entwickelter Prozess-Level-Codes numerisch simuliert und anschaulich visualisiert werden können. Die Visualisierung soll sowohl dem forschenden Wissenschaftler als auch der interessierten Öffentlichkeit helfen besser zu verstehen, in welcher Wechselwirkung die Prozessabläufe mit den komplexen geologischen Strukturen stehen und welche Auswirkungen ihrerseits auf die Integrität des sogenannten "einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) zu erwarten sind.

Im Rahmen des Projektes werden auch die für die numerischen Simulationen erforderlichen thermisch-hydraulisch-mechanischen Materialdaten der geologischen Formationen von den beteiligten Projektpartnern über eine Auswertung relevanter Forschungsliteratur aus den zurück liegenden 30 Jahre zusammengetragen und über eine speziell konfigurierte Datenbank qualitätsgesichert bereit gestellt.

Während der seit November 2010 laufenden 3-jährigen Projektlaufzeit werden auf der Basis dieser Daten auch ausgewählte Experimente im virtuellen Untertagelabor bzw. besonders interessierende Endlagerprozesse mit Process-Level-Codes numerisch simuliert und visualisiert, um die Leistungsfähigkeit der VIRTUS Software-Plattform zu demonstrieren.

Im Nachgang der aktuellen Projektphase ist beabsichtigt VIRTUS so auszubauen, dass den zukünftig an der Endlagerplanung beteiligten Institutionen ein leistungsfähiges Instrument zur schnellen virtuellen Erprobung von Endlagerkonzepten zur Verfügung steht .

9 Literatur

OECD-NEA: Moving Forward with Geological Disposal of Radioactive waste – a collective Statement by the OECD/NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC), NEA No. 6433, Paris, (2008) [1]

OECD-NEA: The role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes. - OECD-Nuclear Energy Agency, Paris, France, (2001) [2]

H.-J. Herbert, H. Moog, T. Rothfuchs, K. Wiczorek, M. Xie: VIRTUS - Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz, Vorprojekt, GRS-257, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, (2009) [3]

J. Hammer, C. Dresbach, J. Behlau, G. Mingerzahn, S. Fleig, T. Kühnlitz, M. Pusch, S. Heusermann, S. Fahland, P. Vogel, R. Eickemeier: Geologische 3D-Modelle für UTD-Standorte - Generierung, Visualisierung, Nutzung. In: Abschlussveranstaltung Förderschwerpunkt Chemo-toxische Abfälle, Februar 2012. Wissensch. Berichte FZKA-PTE, Karlsruhe, (2012) [4]

10 Danksagung

Das Projekt VIRTUS wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02E10890 finanziert. Die Autoren sagen hierfür herzlichen Dank.