

Eine Roadmap zur Entwicklung und Adaption von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) für die Endlagerforschung

M. Krafczyk¹ (Koordinator), V. Brendler², O. Czaikowski³, M. Gruner⁴, N. Hoth⁴, O. Kolditz⁵, T. Nagel⁶, P. Herold⁷, C. Müller⁷, H. Seher³, E. Simo⁷, J. Stahlmann⁸

Stand 22.07.2021

Executive Summary

Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) haben insbesondere in der letzten Dekade wesentliche Beiträge zum wissenschaftlich-technischen Fortschritt geleistet. Das Potenzial von KI-Methoden zur Verbesserung der Prognose naturwissenschaftlicher und technologischer Aspekte bei der Standortauswahl sowie bei der Errichtung und (Nach-)Betriebsphase eines Endlagers (Endlagerentwicklung) wurde bisher jedoch nicht systematisch untersucht. Es wird daher empfohlen, im Rahmen von gezielten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben KI-spezifische Methoden bezüglich der besonderen Anforderungen in der Endlagerforschung zu adaptieren und innerhalb von übergeordneten und spezifischen Handlungsfeldern, d.h. ausgewählten thematische Arbeitsbereichen, zu erarbeiten und zu validieren. Zu den übergeordneten Handlungsfeldern im Rahmen einer Digitalisierung der Endlagerentwicklung zählen der Digital Twin, die Implementierung verteilter Simulationsansätze, die Adaption und Implementierung eines Building Information Models sowie eine Virtualisierung von Workflows, während KI-spezifische Handlungsfelder die Minimierung von Ungewissheiten sowie die Untersuchung selbstlernender bzw. selbstkorrigierender Systeme und das Wissensmanagement adressieren. Bei den Handlungsfeldern sollte insbesondere die Kombination von klassischen Modellierungsansätzen mit KI-Methoden unter Berücksichtigung experimenteller Daten untersucht und validiert werden, um deren gemeinsames Potenzial für eine möglichst genaue und robuste Prognose des langfristigen Verhaltens zukünftiger Endlager aufzuzeigen.

Einleitung

Die im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung und im Projektförderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) zur Sicherheitsforschung für kerntechnische Anlagen 2021-2025 benannten Forschungsthemen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle stecken den aktuellen Rahmen für die anwendungsorientierte Grundlagenforschung zur Endlagerung in Deutschland ab. Die Zielstellungen der Projektförderung des BMWi zur Endlagerforschung sind dabei auf die Schaffung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen sowie die Entwicklung erforderlicher Methoden und Techniken für die Realisierung eines Endlagers insbesondere für hochradioaktive Abfälle ausgerichtet. Es soll damit eine fundierte Wissens- und Entscheidungsbasis für die Endlagerung in

¹ Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen, TU Braunschweig

² Institut für Ressourcenökologie, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V.

³ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

⁴ Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg

⁵ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung

⁶ Institut für Geotechnik, TU Bergakademie Freiberg

⁷ BGE TECHNOLOGY GmbH

⁸ Institut für Geomechanik und Geotechnik, TU Braunschweig

Deutschland sowie die Spezifikation, Bewertung und substanzielle Reduktion von Ungewissheiten erreicht werden. Ergänzend zu den bewährten Werkzeugen werden zunehmend auch in der Anwendung von KI-Methoden Chancen gesehen die gesteckten Ziele zu erreichen. Dies ist möglich durch eine zielführende Adaption von existierenden bzw. gerade in der Entwicklung befindlichen KI-Methoden an die spezifischen Anforderungen der Endlagerforschung, die jedoch nicht zum Ziel hat, den Stand der Grundlagenforschung im KI-Kontext weiterzuentwickeln. Dazu bedarf es der im folgenden aufgeführten Schritte:

- Auf Grund der Vielzahl verschiedener Methoden und Vorgehensweisen, die unter KI subsumiert werden, sind die wesentlichen Grundrichtungen von KI-Methoden, welche für die Endlagerforschung relevant erscheinen, auszuweisen bzw. zu gruppieren.
- Parallel dazu ist für ausgewählte Arbeitsbereiche der Endlagerforschung aufzuzeigen, welches wesentliche Vorankommen durch diese KI-Anwendung erwartet wird.
- Darauf aufbauend ist herauszustellen, in welchem Zeithorizont eine anwendungsbezogene Adaption von KI-Methoden und deren Transfer in den Kontext der Endlagerforschung realistisch ist. Dieser Zeitbezug hat zwei Teilaspekte: Zum einen ist herauszustellen, welche Werkzeuge schon zur Verfügung stehen bzw. noch zu entwickeln sind und zum anderen in welchem zeitlichen Kontext sich ihre Anwendung (und damit auch die Forschung dazu) einordnet. Hier ist die Standortsuche von der Betriebsphase und der Nachbetriebsphase klar zu unterscheiden.

Die Methoden der KI, die für eine Anwendung in der Endlagerforschung in Betracht kommen, sollen im Sinne einer pragmatischen Anwendung in vorhandene Werkzeuge und deren Weiterentwicklung und Anpassung sowie die Entwicklung und Validierung neuer Werkzeuge, deren Anforderungen noch zu definieren sind, unterteilt werden. Für die Einordnung in einen Zeithorizont können die charakteristischen Phasen eines Endlagers genutzt werden. Die generelle Zielstellung der Endlagerforschung besteht in der Vertiefung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen für die entsprechenden Sicherheitsnachweise. Diesbezüglich sind folgende Anwendungsbereiche wesentlich:

- Standortsuche und Erkundung zukünftiger Endlagerstandorte:
Für den Vergleich möglicher Wirtsgesteins- und Standortoptionen können Methoden der KI einen wertvollen Beitrag bei der Bewertung der Barrieren (geologisch / technisch) und für den Nachweis ihrer Integrität leisten. Dieser Beitrag ist durch die Synthese der verfügbaren Informationen möglich, erleichtert Entscheidungsprozesse und unterstützt die Schaffung eines Gesamtmodells.
- Vorbereitung und Einrichtung des Endlagerbetriebes und die nachfolgende Betriebsphase:
Durch die Schaffung eines Gesamtmodells unter Berücksichtigung des Endlagerkonzeptes können die sicherheitsrelevanten Prozesse in der Betriebsphase abgebildet werden. Die KI-Methoden sollen in die Modellentwicklung integriert werden.
- Verschluss des Endlagers und die Nachbetriebsphase:
In diesem Anwendungsbereich können KI-Methoden insbesondere im Bereich des Monitorings angewendet werden. Dadurch können Datenlücken identifiziert und ggf. auch geschlossen werden. Die Nutzung von KI-Methoden, begleitend

zum Monitoring, ermöglicht auch eine Rückkopplung zu einem Gesamtmodell des Endlagers.

Grundsätzlich wird erwartet, dass KI-Methoden in allen Anwendungsbereichen der Endlagerforschung zu einer Reduktion von Ungewissheiten und zu einer adaptiven Modellierung mit verbesserter Prognosefähigkeit beitragen werden. Weiterhin beinhalten KI-Methoden das Potenzial, die gesellschaftliche Akzeptanz des Auswahlprozesses eines Endlagerstandortes durch eine wissenschaftsgeleitete Beantwortung von Querschnittsfragen, wie z.B. der Bewertung komplexer sozio-technischer Fragestellungen zu unterstützen.

Der Umfang und die Tiefe der Übertragbarkeit und Anwendbarkeit von KI-Methoden in der Endlagerforschung sind derzeit noch unklar. Durch entsprechende Forschungsarbeiten könnten hier quantitative Bewertungen ermöglicht werden. Darüber hinaus ist anzustreben, die gewonnenen Erkenntnisse sukzessive mit Methoden des Wissensmanagements [1] langfristig zu integrieren und international verfügbar zu machen.

Modellierung und Simulation in der Endlagerforschung

Die rechnergestützte Modellierung von Phänomenen und Prozessen in der Endlagerforschung hat sich in den letzten Jahrzehnten durch signifikante Fortschritte in der fachbezogenen mathematisch-physikalischen Modellierung, den numerischen Methoden und der Leistungsfähigkeit paralleler Hardware zu einer wesentlichen Säule in der Analyse- und Prognosefähigkeit für Endlagersysteme entwickelt. Darüber hinaus konnten solche Modelle mehrheitlich von einer komplementär dazu erhobenen umfangreichen experimentellen Datenbasis parametrisiert und validiert werden. Trotz dieser substanziellen Fortschritte sind noch viele wesentliche Fragestellungen in Endlagersystemen nur durch die Verwendung von Konservativitäten zu beantworten und damit nicht hinreichend robust und belastbar mit den verfügbaren Methoden abzubilden. Dies trifft insbesondere auf die Unterstützung von Modellierung und Simulation für eine zukünftige Bewertung potenzieller Endlagerstandorte zu,.

Neben den bekannten klassischen Ansätzen (deterministisch / stochastisch) zur Modellierung dynamischer Systeme (meist in Form der Lösung von partiellen Differentialgleichungen oder Reduced Order Modellen) haben sich in der letzten Dekade komplementäre Modellierungsansätze entwickelt, die der Einfachheit halber meist unter der Rubrik KI-Methoden subsumiert werden. Hierunter fällt eine Reihe von unterschiedlichen Verfahren, die wesentlich dem sog. Maschinellen Lernen zuzuordnen sind und auf die im Verlauf dieses Papiers noch dedizierter eingegangen wird. Diese Ansätze haben sich schon in vergleichsweise kurzer Zeit in vielen datenzentrierten Disziplinen als extrem leistungsfähig erwiesen, ohne dass ein fundamentales Limit ihres Potenzials absehbar ist. Es liegt daher nahe, KI-Methoden auch für die Endlagerforschung zu adaptieren. Dieses Papier beginnt daher mit einer Einordnung und der möglichen Orientierung konkreter Anwendungsfelder als Teil einer konsistenten Weiterführung der Digitalisierung in der Endlagerforschung. Dabei werden zunächst übergeordnete Handlungsfelder einer Modellierungs- und Simulationsmethodik beschrieben, die, basierend auf dem vorhandenen methodischen Kanon, zukunftsorientiert, konsistent und nachhaltig KI-Methoden sinnvoll einbetten.

Mit der Förderung der Digitalisierung in der Endlagerforschung im Allgemeinen sowie der Adaption und Anwendung von KI-basierten Methoden im Besonderen kann mittelbar ein erhebliches technisches Potenzial in der Endlagertechnologie nutzbar werden, in dem die Robustheit und damit die Sicherheit des Endlagersystems erhöht werden.

Übergeordnete Handlungsfelder der Digitalisierung von Endlagern

Die Adaption von KI-Methoden in allen Phasen der Endlagerentwicklung legt nach Ansicht der Autoren nahe, Handlungsfelder (d.h. ausgewählte thematische Arbeitsbereiche) mit direktem Bezug auf die Digitalisierung in der Endlagerforschung herauszuarbeiten. Zu diesen zählen Entwicklungen in den Bereichen:

1. Modellkopplung (z.B. Digital Twin) ggf. unter Verwendung von Multiagentensystemen
2. Building Information Modeling (BIM) in Kombination mit Geoinformationssystemen (GIS) und
3. Virtualisierung

Hier liegt der Fokus jeweils klar auf ihrer Adaption bzw. Erweiterung für die Endlagerforschung. Im Folgenden wird auf diese Begriffe Bezug genommen und ihre potenzielle Bedeutung für die Endlagerforschung skizziert.

Bei der Beschreibung von Endlagern steht der Systemaspekt im Vordergrund, da die konstituierenden Teilsysteme in meist hochgradig nichtlinearer Weise auf zum Teil sehr unterschiedlichen Zeit- und Raumskalen zusammenwirken und die Funktionalität und Robustheit des Gesamtsystems determinieren. Aus physikalisch-mechanischer Sicht handelt es sich hierbei meist um gekoppelte Partialsysteme repräsentiert durch entsprechende hydraulische, struktur- und strömungsmechanische sowie chemische und ingenieurtechnische Partialmodelle, welche jeweils schon intrinsisch ein hohes Maß an Komplexität zeitigen und in spezialisierten Forschungsdomänen bearbeitet werden.

Neben diesen naturwissenschaftlich orientierten Teilsystemen spielen eine Vielzahl von Prozessen mit entsprechenden ortsabhängigen Randbedingungen im Kontext der Einlagerung oder des Betriebes eine wesentliche Rolle für das Langzeitverhalten des Gesamtsystems, welche im Wesentlichen die aktiven Maßnahmen zur Einrichtung und zum Betrieb einer Anlage beschreiben und über die Laufzeit der Anlage substantiell variieren können.

Die Zielsetzung einer zukunftsorientierten Modellierung besteht jedoch nicht nur in der Unterstützung der Entwurfs- und Errichtungsphase eines Endlagers, sondern in der simulativen Begleitung aller Phasen einer solchen Anlage (Erkundung, Betrieb, Nachbetriebsphase). Aus Monitoringdaten in Verbindung mit hochentwickelten Simulationsverfahren können so die Auswirkungen eines dynamischen Status quo sowie von potenziellen Maßnahmen im Schadens- bzw. Krisenfall über alle Phasen, bis zur Entlassung aus der menschlichen Obhut, bestmöglich evaluiert werden. Zusätzlich zu einer solch extrapolativen Prognose des Systemverhaltens aus Monitoringdaten sollen Simulationsverfahren auch die Optimierung von Teilsystemen während der Betriebs- und für die Nachbetriebsphase basierend auf disziplinspezifischen Zielfunktionen erlauben und damit langfristig zu einem wirtschaftlich und sicherheitstechnisch optimierten Betrieb des Endlagers beitragen.

Unabhängig davon, ob ein existierendes oder zu entwickelndes Partialmodell dem Kontext klassischer oder KI-basierter Modellansätze zuzuordnen ist, kann eine maximal prognosefähige Modellierung und Simulation des Gesamtsystems nur erreicht werden, wenn alle relevanten Partialmodelle in ihrem wechselseitigen Einfluss zumindest potenziell gekoppelt werden können. Eine solche Kopplung kann über ein virtuelles Gesamtmodellsystem in Form eines sogenannten **Digital Twins** (DT) erfolgen [1][3], der auf räumlich verteilter Hardware (d. h. auch an unterschiedlichen Standorten oder in einer dedizierten HPC⁹-basierten (Cloud-)Umgebung) implementiert werden kann. Dieser DT eines Endlagers beinhaltet eine Vielzahl von (potenziell gekoppelten) Partialmodellen und erlaubt eine belastbare und robuste Prognose des Verhaltens eines realen Endlagersystems unter spezifischen operativen Bedingungen durch Vorgabe entsprechender Anfangs- und Randbedingungen oder Prozessbeschreibungen im Sinne von vielfältigen „Was wäre, wenn?“ -Szenarien. Ein Digital Twin kann auch als vereinfachtes Surrogatmodell fungieren¹⁰. Änderungen an einzelnen Partialmodellen können weitgehend von Änderungen in anderen Partialmodellen entkoppelt werden, was zu einer weit flexibleren wissenschaftlichen Arbeit innerhalb von Forschungsverbänden führt. Als mögliche Ansätze zur Implementierung eines DT haben sich z. B. sogenannte **Multiagentensysteme** [4][5][6] bewährt, bei denen jedes beteiligte Partialmodell durch einen Softwareagenten gekapselt wird, der innerhalb des virtuellen Gesamtsystems auf Zustandsänderungen anderer Agenten reagiert und eigene Zustandsänderungen an das Gesamtsystem (und damit an andere Agenten) kommuniziert.

Neben dem Aspekt der Kopplung von Partialmodellen steht die geeignete Repräsentation der Modelldaten im Vordergrund. Im Kontext der Endlagerung ist eine zu errichtende Infrastruktur in einen topografischen und geologischen Kontext einzubetten. Bei Bauwerken kann im Rahmen des **Building Information Modeling (BIM)** [7] als minimaler Ausgangskonsens neben proprietären Datenformaten auf das Datenformat und das Informationsmodell der Industry Foundation Classes (IFC) [8] zurückgegriffen werden. Komplementär hierzu werden topografische Informationen wesentlich über **Geoinformationssysteme (GIS)** mit unterschiedlichen Datenformaten eingesetzt. Geologische Daten sind weniger standardisiert, hier haben sich noch keine standardisierten Datenformate etabliert. Insgesamt wird die Entwicklung eines DT neben Modellierungsaspekten auch die Einführung oder Weiterentwicklung geeigneter Datenformate im Sinne einer Vereinigungsmenge von BIM- und GIS-Datenbeschreibungen erfordern, die im Falle einer Bewährung auch zu einer zumindest nationalen Standardisierung beitragen können. Neben den beschreibenden geometrischen Daten ist eine konsistente Datenhaltung aller Zustandsdaten eines DT über geeignete Datenformate und (verteilte) Datenbanken eine wesentliche Voraussetzung für den effizienten Einsatz eines DT. Im Kontext Forschungsdatenmanagement sollten Synergien mit der Nationale(n) Forschungsdateninfrastruktur (NFDI [9]) und ihren bestehenden Konsortien (z. B. NFDI4ING [10], NFDI4EARTH [11] u.a.) angestrebt werden, um methodische Synergien bei der Erhebung, Speicherung, Referenzierung und Auswertung von Daten nach den FAIR-Prinzipien (**F**indable, **A**ccessible, **I**nteroperable, and **R**e-usable) [14] zu erzielen.

Die Entwicklung eines DT als Synonym für einen gekoppelten Modellierungsansatz für standortspezifische Endlagerplanungen bedarf im Sinne der langfristigen

⁹ High Performance Computing

¹⁰ Bei einem Surrogatmodell werden spezifische Systemattribute aus Modellrechnungen abgeleitet, die aus unterschiedlichen Gründen nicht direkt experimentell zugänglich sind.

Verwendbarkeit und Erweiterbarkeit von Simulationssoftware auch der Berücksichtigung innovativer Ansätze bei der Softwareentwicklung in den einzelnen beteiligten Arbeitsgruppen. Obwohl Techniken wie Test-Driven Development [13], Virtualisierung oder Agiles Entwerfen in diversen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen schon Einzug gehalten haben, ist anzustreben, bei der Entwicklung und Implementierung von Partialmodellen einen Mindeststandard bei der Softwareentwicklung einzuhalten, um eine langfristig stabile Softwareentwicklung für den DT sowohl in den beteiligten Arbeitsgruppen als auch einen robusten Betrieb bei den späteren Nutzer-Institutionen sicherzustellen. Zur **Virtualisierung** von Workflows in der Endlagersystemanalyse wird im Folgenden auch ein KI-spezifisches Handlungsfeld beschrieben.

Typisierte Handlungsfelder von KI-Methoden in der Endlagerforschung

In Anlehnung an [12] können Handlungsfelder von KI-Methoden in unterschiedliche und semantisch eigenständige Gruppen unterteilt werden (siehe Tabelle 1). Innerhalb jeder Gruppe werden z. T. völlig unterschiedliche Methoden mit eigenständiger Funktionalität und Mächtigkeit eingesetzt. Komplexere Anwendungsfelder der KI können sich dabei übergreifend auch aus Methoden der KI aus mehreren Gruppen zusammensetzen.

Tabelle 1 Kurzbeschreibungen der für die Endlagerung als potenziell relevant erachteten Gruppen von KI-Anwendungen

| Gruppe | Beschreibung |
|----------------|--|
| Identifizieren | <ul style="list-style-type: none"> • Das Erkennen bestimmter Objekttypen in Bildern oder Videosignalen. • Das Analysieren von Sensordaten zum Erkennen von Objekttypen und/oder Situationen allein aus dem Signal heraus. • Das Analysieren von Daten, um bestimmte Tatsachen und/oder Ereignisse zu erkennen, die diese Daten repräsentieren. • Das Analysieren von Texten, um Informationen über Entitäten, Zeit, Orte und Fakten zu extrahieren, die ausschließlich im Text enthalten sind. |
| Erschließen | <ul style="list-style-type: none"> • Das Vorhersagen von Ereignissen oder Zuständen in der Zukunft auf der Grundlage eines Verständnisses eines aktuellen Systemzustandes und der Funktionsweise dieses Systems. |
| Lernen | <ul style="list-style-type: none"> • Das Erkennen von Beziehungen zwischen Merkmalen, die dazu verwendet werden können, das Vorhandensein eines Satzes von versteckten Merkmalen vorherzusagen, wenn andere sichtbar sind. • Das Erkennen neuer Kategorien von semantischen Werten auf der Grundlage von Merkmalssammlungen. • Das Überarbeiten von existierendem Wissen oder von Regeln zur Unterstützung zukünftiger Handlungen oder Schlussfolgerungen. |

KI-spezifische Handlungsfelder in der Endlagerforschung

Neben den o. a. übergeordneten Handlungsfeldern der Digitalisierung werden nachfolgend Handlungsfelder mit spezifischen KI-Bezügen aufgeführt. Diese beziehen sich auf den in Abbildung 1 dargestellten Entsorgungspfad der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, in welchem sich Teilsysteme identifizieren lassen, die wiederum Subsysteme beinhalten. Die Prognose des Gesamtsystems bzw. seiner Teilsysteme kann nach Auffassung der Autoren durch den Einsatz von KI-Methoden

signifikant verbessert werden, insbesondere, wenn die inverse Modellierung von Prozessen im Vordergrund steht.

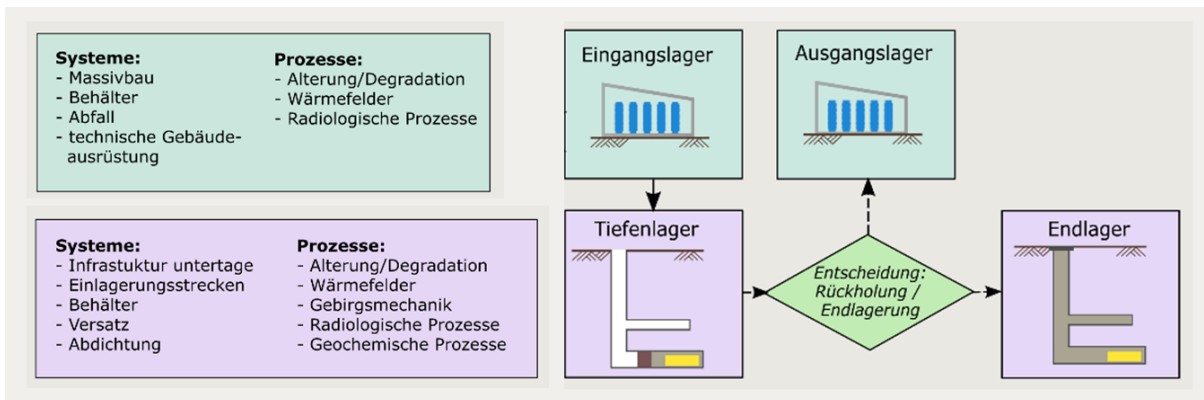


Abbildung 1: Technische Systeme und Prozesse (Die in der Abbildung enthaltene Unterscheidung in Tiefen- und Endlager trägt der Option der Rückholung Rechnung)

Handlungsfeld 1: Systemarchitektur Digital Twin und BIM für die Endlagerforschung

Ein wichtiger Aspekt der Endlagerforschung ist die Modellierung des zukünftigen Endlagers unter Einbeziehung von Monitoringdaten als virtuellem Gesamtsystem, welches durch den Digital Twin repräsentiert werden kann. Für einen solchen DT wäre ein entsprechendes Prozess- und Datenmodell zu entwerfen, welches als offenes, erweiterbares Entwicklungsframework implementiert werden sollte, auf dem dann die konkreten virtuellen Workflows aufsetzen können. Die in den Handlungsfeldern 1-5 zu entwickelnden Partialmodelle können dann auf dieser Systemarchitektur durch Implementierung geeigneter Schnittstellen aufsetzen, um eine partitionierte mono- oder bidirektionale Kopplung zwischen Partialmodellen zu implementieren. Der Entwurf des Prozess- und Datenmodells sollte sich zur effizienten Einbindung von KI-Werkzeugen an den wichtigsten Entwicklungsumgebungen für KI-Methoden orientieren. Hier seien exemplarisch PyTorch [28] und TensorFlow [29] genannt. Diese Bibliotheken erlauben unter anderem eine substantielle Beschleunigung komplexer KI-Simulationen durch General Purpose Graphics Processing Units. Das Prozess- und Datenmodell des Digital Twins sollte daher auch die Einbindung solcher Hardware ermöglichen. Weiterhin ist anzustreben, dass die Systemarchitektur des Digital Twins eine effiziente Nutzung von cloud-Diensten zulässt, damit langfristig auch kleinere Projektteams ohne spezifischen Zugang zu großen Compute-Ressourcen diesen effizient zu Simulation und Analyse von endlagerbezogenen Problemstellungen nutzen können.

Ein weiterer Aspekt ist die Anforderungsanalyse für ein geeignetes *BIM-Datenmodell* für ein Endlager und dessen prototypische Umsetzung. Grundsätzlich soll ein BIM-System nicht nur die vereinheitlichte Abbildung topologischer, geometrischer und topografischer Daten eines Endlagers ermöglichen, sondern auch modellspezifische Eigenschaften klassischer oder KI-basierter Partialmodelle oder aus ihnen abgeleitete Eigenschaften enthalten. Diese Attribute müssen in Bezug auf die langfristigen Anforderungen an ein virtuelles Endlager identifiziert und hierarchisch strukturiert werden, um nachfolgend entsprechend des aktuellen und offenen IFC-ISO-Standards [30] implementiert zu werden. Das daraus resultierende grundlegende BIM-Modell kann von allen zukünftigen Partialmodellen genutzt und standardkonform erweitert

werden. Das BIM-Endlager-Modell stellt damit eine fundamentale Komponente des Digital Twins dar.

Handlungsfeld 2: Virtualisierung von Workflows in der Endlagerforschung

Wie in den übergeordneten Handlungsfeldern bereits erwähnt, ist die Entwicklung von standardisierten / qualitätsgeprüften Workflows ein wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung von Digital Twins und adressiert die Quantität und Qualität der Interaktion von Benutzenden desselben, d. h. einen kontinuierlichen Workflow zur Initiierung, Bedienung und Validierung des Digital Twins – möglichst ohne Datenverluste. Dies betrifft sowohl die Aufbereitung eines konkret zu simulierenden Szenarios (also der Definition aller geometrischen und Prozessattribute für ein konkretes Endlager in einem spezifischen Planungs-, Bau- oder Betriebszustand) als auch die Benutzerinteraktion während der Laufzeit der Simulation und die Visualisierung der Zustands- bzw. Ergebnisdaten. Im Idealfall ist anzustreben, mit dem Digital Twin ähnlich zu interagieren wie mit einem experimentellen (Labor-)System, in dem entsprechende (virtuelle) Systemattribute vom Benutzenden z. B. über eine grafische Benutzeroberfläche (oder innerhalb einer Virtual- oder Augmented Reality-Umgebung) modifiziert werden. Hier sollten optional unterschiedliche Zugangslevel vorgesehen werden, um unbeabsichtigte Modifikationen (beispielsweise in dedizierten numerischen Kernels oder der Parametrisierung komplexer mechanischer Strukturmodelle) zu verhindern und nur entsprechend qualifizierten und autorisierten Nutzenden zugänglich zu machen. Entsprechende Autorisierungen und Validierungen können über Verzweigungen in Software-Versionierungssystemen und das sog. *Test-driven Development* [13] realisiert werden.

Unter dem Begriff der Virtualisierung von Endlagersystemen wird im weiteren Sinne eine visuelle Integration von diversen (auch online) Monitoringdaten und Modellergebnissen (unterschiedlicher Komplexitätsstufen, prozessbasiert bzw. datengetrieben) in einem realen geografischen/geologischen Kontext mit interaktiven und interoperablen Werkzeugen mittels Methoden der Virtuellen Realitäten (VR) verstanden. Dabei ist langfristig auch eine Automatisierung im Workflow vorgesehen (z. B. automatisches Rekalibrieren von Modellen durch Integration neuer Messdaten), wenn entsprechende Validierungen erfolgt sind.

Das Handlungsfeld zur Virtualisierung von Endlagersystemen adressiert zunächst zwei Aspekte, ein (i) methodisches (visual analytics) und ein (ii) unterstützendes (visual workflows).

(i): Im methodischen Bereich (visual analytics) können KI-basierte Werkzeuge zur Mustererkennung (pattern recognition) und zur Extraktion vorgegebener Merkmale (feature extraction) adaptiert, angewendet und bereitgestellt werden. Dies betrifft sowohl Modelldatensätze (z. B. aus vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen oder von KI Anwendungen) als auch real gemessene, große Datensätze (z. B. hochauflösende Laserscandaten für die Beschreibung von Untergrundstrukturen). Durch den Einsatz von Methoden der Virtuellen Realitäten können so beispielsweise die Ergebnisse deterministischer Modellrechnungen mit Resultaten der trainierten KI Modellierung oder gemessene und berechnete Daten visuell verknüpft und verglichen werden (sogenannte mixed oder augmented reality Konzepte). Für eine anwendungsnahe Entwicklung und Validierung der Methodik ist hierzu die Entwicklung einer einheitlichen Datenstruktur erforderlich, welche für ein größeres Anwendungsspektrum zu implementieren wäre. In dem bereits abgeschlossenen VIRTUS-Vorhaben [25] wurde

als Vorläufer des Digital Twins noch am Desktop-Rechner auf generische Modelle zurückgegriffen und diese für alle Benutzenden auf einem zentralen Server verfügbar gemacht (Vorgehensweise eines BIM). Die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden anschließend visualisiert. Hierbei können die Funktionalitäten erheblich erweitert, standardisiert und angewendet werden. Dazu können umfangreiche, komplexe Datensätze und Prozessbeschreibungen aus nationalen und internationalen untertägigen Anlagen genutzt werden. Als Beispiele seien hier exemplarisch genannt: *Reiche Zeche* (Lehr- und Forschungsbergwerk), *Mt. Terri* (Untertagelabor) und *Schachanlage Konrad* (Umbau zum Endlager erfolgt derzeit).

(ii): Der Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz wird zur Erzeugung großer und komplexer Modelldatensätze führen, insbesondere wenn er im Kontext zahlreicher Standort-Varianten erfolgen würde. Für die entsprechende Daten- und Modellintegration können visuell unterstützende Workflows (visual workflows) entwickelt und bereitgestellt werden. Dabei können auch innovative Methoden für eine visuelle Auswertung zur Laufzeit von Modellen zum Einsatz kommen (sogenannte in-situ Visualisierung).

Sowohl die (i) methodischen als auch die (ii) unterstützenden Workflows sollten in einem weiteren Schritt (iii) im Austausch mit den Stakeholdern der Endlagerung evaluiert und bewertet werden, u. a. auch im Hinblick auf den bereits genannten, übergeordneten Ansatz des *Digital Twins*.

Handlungsfeld 3: Minimierung von Ungewissheiten bei Standortinformationen und Sicherheitsanalysen

Im Rahmen der Endlagerforschung und speziell auch bei der zukünftigen Anwendung im Rahmen der anstehenden Standortsuche für ein zukünftiges Endlager für hochradioaktive Abfälle, bei der die potenzielle Schaffung permeabler Bereiche in der Erkundungsphase bestmöglich zu vermeiden ist, kommt einer zerstörungsfreien und minimalinvasiven Charakterisierung potenzieller Wirtsgesteinsformationen eine besondere Bedeutung zu. Ergänzend zu klassischen Erkundungs- und Prognosemethoden kann die zukünftige Nutzung von KI-Methoden bei der zumeist komplexen Auswertung von Erkundungsdaten einen wichtigen Beitrag dazu leisten. Das grundlegende Wesen von KI-Verfahren und speziell neuronalen Netzen besteht in der Fähigkeit des selbständigen Lernens und der nachfolgenden Nutzung dieses "Wissens" zur Interpretation unbekannter Situationen. Diese Ansätze haben daher ein sehr großes Potenzial zur Analyse unscharfer Ursache-Wirkungsprinzipien mit multiplen Zusammenhängen.

Gleichzeitig sind entsprechende Verfahren in anderen Wissenschaftszweigen und Ingenieurdisziplinen stetig weiterentwickelt worden. Eine Übertragung bekannter Verfahren auf Themenschwerpunkte der Endlagerung ist grundsätzlich möglich, womit ein qualitatives oder je nach verfügbaren Daten auch quantitatives Erkennen von Zusammenhängen ermöglicht werden kann. Weiterhin können im Bereich der räumlichen Zusammenhänge KI-Methoden räumliche Prognosen (wo kann ein Ereignis eintreten?) bzw. bei zeitlichen Abhängigkeiten auch Prognosen zum Eintrittszeitpunkt (wo und wann tritt ein Ereignis ein?) unterstützen.

Die Bildung geologischer Strukturen ist in aller Regel ein sehr langwieriger und komplexer Prozess. Die vielfältigen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und zeitlichen Abfolgen machen eine exakte mathematische Modellierung unmöglich. Vielmehr bestehen z. T. sehr gute Kenntnisse zu einzelnen

Sachverhalten/Abhängigkeiten, jedoch ohne deren Wechselwirkung untereinander quantitativ genauer zu kennen. Diese Aussage trifft auch hinsichtlich der Auswahlkriterien für die Standortauswahl zu: viele Messwerte können multiple Ursachen haben und sind nicht eindeutig interpretierbar. In diesem Umfeld bestehen die Stärken der KI-Verfahren im Erkennen des "Fußabdrucks" bekannter geologischer Strukturen in der Vielzahl vorhandener Datenebenen. Das Gelernte kann anschließend zur Suche von bisher unbekanntem Objekten eingesetzt und in geeigneten Potenzialkarten erfasst werden, welche eine effizientere Exploration ermöglichen. Im Fall der Erstellung von Risikokarten ist die Vorgehensweise analog: Die Lokalitäten bekannter Georisiken können im Kontext der bekannten Daten zu den kontrollierenden Parametern zum Trainieren eines KI-Verfahrens genutzt werden.

Die aufbauend auf gewonnenen Erkundungsergebnissen durchgeführte modellgestützte Analyse gekoppelter physikalischer, chemischer und biologischer (THMC/B) Prozesse soll Entscheidungen beim Auslegen von Endlagersystemen und deren Komponenten sowie die Nachweisführung (Safety Case) unterstützen. Dies erfordert jedoch auch das Verständnis der Aussagekraft der Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung der vorhandenen Wissens- und Datenlücken, wie es auch im Standortauswahlgesetz [15] gefordert ist. Ungewissheiten in den Modellvorhersagen liegen sowohl in klassischen auf partiellen Differentialgleichungen basierenden Ansätzen als auch bei der Verwendung von KI-Methoden vor. Diese leiten sich in der Regel aus einem unvollständigen Wissen hinsichtlich des Aufbaus und der Struktur des Untergrundes (Geometrie), der ablaufenden THMC/B Prozesse und ihrer Interaktionen bzw. deren mathematisch-physikalischer Beschreibung, der für die Beschreibung dieser Prozesse charakteristischen Eigenschaften der Endlagersystemkomponenten inkl. deren räumlicher Verteilung, der zeitlichen Entwicklung der Systemrandbedingungen, der technischen Umsetzung der konzeptionellen Modelle in Software, stochastischer Effekte und räumlicher Heterogenitäten auf diversen Skalen ab, welche direkt oder indirekt in die Analysen einfließen. Daraus folgen Ungewissheiten in den Modellvorhersagen, die im Rahmen einer Unsicherheitsanalyse quantifiziert bzw. erfasst werden müssen und ebenso in die Entscheidungsfindung mit einfließen sollen. Wie stark Ungewissheiten in den Eingangsgrößen Ungewissheiten in den Ausgangsgrößen beeinflussen, ist Gegenstand der Sensitivitätsanalyse, die letztlich Rückschlüsse auf vorrangig zu präzisierende Eingangsgrößen ermöglicht bzw. Wege zur (Teil-)Modellreduktion und Aggregation weisen. Letztere ist auch bei der Entwicklung KI-basierter Modelle von besonderem Interesse.

Die potenziellen Einsatzfelder von KI-Methoden in diesem Zusammenhang sind vielfältig. Die Untersuchung von Ungewissheiten und Sensitivitäten in THMC/B Analysen ist noch einmal weitaus rechenintensiver als diese Analysen selbst. Daher können KI-Methoden bspw. bei der Generierung von Surrogatmodellen eingesetzt werden, die das Systemverhalten in einem bestimmten Trainings- bzw. Validierungsraum abbilden und um Größenordnungen effizienter berechnen. Zudem sind Varianten des Maschinellen Lernens potenziell geeignet, die Berechnungen selbst effizienter zu gestalten, vor allem in mehrdimensionalen Parameterräumen. Weiterhin können klassische THMC/B Modelle durch datenbasierte und rechentechnisch effizientere Teilmodelle ersetzt werden. Aufgrund der oft eingeschränkten Datenlage und des sicherheitsrelevanten Anwendungskontexts, müssen die dafür eingesetzten KI-Methoden geeignet gewählt bzw. weiterentwickelt werden, um physikalische Konsistenz zu gewährleisten. Bei vielen rein datenbasierten Ansätzen ist dies nicht oder nur ungenügend der Fall. In diesem Zusammenhang ist

auch die Möglichkeit zu untersuchen, ob durch die KI-basierte Vernetzung von Wissensgebieten gezielt Ungewissheiten reduziert werden können.

Die für die obigen Aufgaben geeigneten KI-Methoden sind in weiten Teilen noch zu identifizieren und v. a. zu bewerten. Dies gilt zuvorderst im Kontext von THMC/B Kopplungen sowie von Verifizierung und Validierung der in der Endlagerforschung eingesetzten Modelle. Hierfür sind stringente Verfahrensweisen zu entwickeln, welche die Aussagekraft und Verlässlichkeit der eingesetzten datenbasierten Modelle belegen. Diese Aspekte werden auch mit den FuE-Bereichen C1 und C3 des Förderprogramms des BMWi [26] adressiert. Neben anwendungsbezogenen Fragestellungen sind daher unbedingt auch grundlegende Fragestellungen zu untersuchen, z. B. zu Fragen wie aleatorische und epistemische Ungewissheiten in Bezug auf die Trainingsdatensätze die KI-basierten Analysen beeinflussen.

Das Handlungsfeld wird somit durch folgende Themenschwerpunkte charakterisiert:

- Adaption bestehender KI-Verfahren im Hinblick auf Fragestellungen der Standorterkundung und bei der Auswertung von Erkundungsdaten
- Analyse unscharfer Ursache-Wirkungsprinzipien im Rahmen der Standortsuche, -erkundung und Sicherheitsbetrachtung
- Anwendung und Entwicklung von KI-Methoden zur Bewertung und zum Abbau von Ungewissheiten in Modellvorhersagen
- Anwendung und Entwicklung von KI-Methoden zur Vernetzung und gezielten Verknüpfung von Teilmodellen und Wissensgebieten

Handlungsfeld 4: Selbstlernende bzw. selbstkorrigierende Systeme

Der Entsorgungspfad für hochradioaktive Abfälle reicht von der Zwischenlagerung bis zur Entlassung des verschlossenen Endlagers aus der menschlichen / institutionellen Obhut. Er umfasst interagierende technische Systeme und Prozesse und entscheidungsbasierte Verzweigungen. Sieht man den Entsorgungspfad als Gesamtsystem, so lassen sich Teilsysteme identifizieren, die wiederum Subsysteme beinhalten (vgl. Abbildung 1). Die räumliche und zeitliche Abbildung dieser Systeme und Prozesse sowie deren Interaktionen erfolgen auf der Grundlage eines naturwissenschaftlichen sowie ingenieurtechnischen und -wissenschaftlichen Modellsystems. Die Modellbildung erfordert Annahmen und Vereinfachungen der realen Verhältnisse (d. h. des Realsystems), um die Systeme und das Systemverhalten analysieren und letztlich Prognosen erstellen zu können. Zur Überprüfung der Validität der Annahmen und Vereinfachungen bzw. zur Quantifizierung der sich aus den Modellen ergebenden Fehlergrößen werden am Realsystem Daten zum Initialzustand und zu den Zustandsänderungen erhoben. Dies erfolgt im Rahmen von Monitoringprogrammen insbesondere während der Errichtungs- und Betriebsphase, die außer der eigentlichen Messwertaufnahme, -auswertung und -interpretation auch Plausibilitätskontrollen umfassen. Bei im Rahmen der Ungewissheiten nicht akzeptablen Abweichungen zwischen den aus den Modellen prognostizierten Entwicklungen und den messtechnisch erfassten Zustandsänderungen werden Modellanpassungen erforderlich. Ausgehend von einem initialen Ingenieurmodell, in dem einzelne oder auch mehrere interagierende Systeme und Prozesse abgebildet sind, kann durch Einspeisung von Monitoringdaten bei entsprechenden Abweichungen eine Adaption des Modells erfolgen. Beispielsweise könnte dies modellierungstechnisch auf der Grundlage eines Digital Twins mit

interagierenden Teilsystemen auf der Grundlage eines Multiagentensystems erfolgen. Mit der Akquisition von (Monitoring-) Daten am Realsystem kann dann die Adaption des Modells mit Hilfe der Methoden der Künstlichen Intelligenz erfolgen.

Ein Grundprinzip der datengetriebenen Methoden der KI ist das Training des Systems mit Daten. Der Entsorgungspfad beinhaltet Teilsysteme, die bereits mehrfach ausgeführt wurden, wie z. B. Schächte und Strecken in Grubengebäuden. Auf der Grundlage der in der Vergangenheit gewonnenen Erfahrungen und der erhobenen Daten können die KI-Verfahren für neue ähnliche Teilsysteme trainiert werden. Für die Teilsysteme und Prozesse im Endlager ist eine differenziertere Betrachtung erforderlich. Das System Endlager für hochradioaktive Abfälle wird ein Unikat darstellen. Auf komplementäre Erfahrungen und Daten kann daher nur für Teilsysteme zurückgegriffen werden. Beispielhaft seien hier die Bereiche Untertägiger Hohlraumbau, Betrieb von Untertagedeponien oder Untertagelaboren sowie internationale Erfahrungen mit Endlagern genannt. Um das Defizit in der Datenbasis für das Training auszugleichen, bieten sich physik-informierte Methoden der KI an [16]. Insbesondere für die THM-Modellierung ist die Forschung (z. B. Forschungsverbund WEIMOS [16][18]) bereits weit fortgeschritten. Mit dem Auffahren des Endlagers startet die Akquisition von lokationsspezifischen, direkt verwendbaren Daten. Die erforderlichen Monitoringprogramme waren und sind Gegenstand mehrerer Forschungsvorhaben (z. B. MODERN [19], MODERN2020 [20], MONTANARA [21], ENTRIA [22][23], TRANSENS [24]). Mit der Einspeisung dieser Daten in das Modell ist die Grundlage für ein selbstlernendes und selbstkorrigierendes System gegeben. Es handelt sich dabei allerdings um einen asynchronen Prozess, bei dem die Realisierung der Teilsysteme der Datenakquisition vorausgeht. Ein selbstkorrigierendes System bedingt daher eine Flexibilisierung der Planungen und der Ausführung, um Korrekturen begangener Fehler zu ermöglichen. Unabhängig davon liefert das durch KI-Methoden an die realen Zustandsänderungen adaptierte Ingenieurmodell genauere Prognosen der zukünftigen Zustandsänderungen.

Handlungsfeld 5: Wissensmanagement/sozio-technische Aspekte

Standortauswahl, Genehmigung und Bau eines Endlagers von radioaktiven Abfällen sind gesellschaftliche Aufgaben, die uns über sehr lange Zeiträume beschäftigen. Felder wie z.B. Partizipation oder auch Transdisziplinarität sowie Wissensmanagement haben in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Auf diesen Feldern sind aktuell und zukünftig Forschungsfelder zu adressieren und zu bearbeiten.

Von den unterschiedlichsten Fachgebieten werden in diesem Zeitraum eine Vielzahl von verschiedenartigen Dokumenten erstellt. Dazu zählen z. B. Fachberichte, Zeitschriftenbeiträge, Protokolle, Messdaten, Fotos, Pläne, Sensordaten, Anträge, Gutachten, Stellungnahmen und Genehmigungen. Außerdem werden von unterschiedlichsten Personen in jedem Arbeitsschritt Entscheidungen getroffen, die eine Auswirkung auf andere Fachgebiete und auch das gesamte Verfahren haben können.

Für neu hinzukommende Personen ist es kaum möglich, alle bisherigen Dokumente und Entscheidungen zu kennen bzw. das darin enthaltene Wissen zu erwerben. Dieses „Generationenproblem“ betrifft alle an der Endlagerforschung langfristig

beteiligten Institutionen. Auch ist ein Überblick über die Auswirkungen einer Entscheidung auf das gesamte Verfahren für die betroffene Person kaum möglich.

Sozio-technische Aspekte werden relevant bei der gesellschaftlichen Aufgabe das erlangte Wissen einer breiten, interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Im Vorhaben ENTRIA [22][23] wurden und im Vorhaben TRANSENS [24] werden erste Arbeiten zu den sozio-technischen Aspekten mit einem klassischen Methodenansatz durchgeführt. Das neue Förderprogramm des BMWi adressiert diese Aspekte im FuE-Bereich D. Die Arbeiten zum Handlungsfeld 5 bezieht sich im Wesentlichen auf das FuE-Feld D1.1 *Methoden und Instrumente des Wissens- und Kompetenzmanagements* [26].

Ein mit Methoden der KI unterstütztes Wissensmanagement zielt darauf ab, die beteiligten Personen bei dieser Problematik zu unterstützen. Dafür können alle Informationen und Dokumente für eine digitale Verwendung aufgearbeitet, zur Verfügung gestellt und für neue Dokumente Standards zur Einbindung in dieses Konzept des Wissensmanagements entwickelt werden. Methoden der KI können im Anschluss dabei eingesetzt werden, Sinnzusammenhänge in den vorliegenden Dokumenten zu erfassen und Querverweise innerhalb eines Dokuments oder zu anderen Dokumenten zu erkennen. Entscheidungen sollten mit den entsprechenden Begründungen ebenfalls in digitaler Form gespeichert werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse werden als sogenannte Wissensgraphen abgelegt, so dass sie für intelligente Suchalgorithmen auffindbar sind. Dadurch ist es den Nutzenden möglich sich das darin enthaltene Wissen zu erschließen. Die aufbereiteten Daten können anschließend, wenn möglich georeferenziert, mit dem DT verknüpft werden.

Im Weiteren können Methoden der KI den Nutzenden darin unterstützen, das erschlossene Wissen für die weitere Arbeit einzusetzen. Dazu kann die Unterstützung bei der Eingabe in Dokumentationssysteme oder bei Modellrechnungen zählen.

Roadmap

Die Schwerpunkte einer Strukturierung des Einsatzes der KI über die Phasen der Endlagerung in den einzelnen Handlungsfeldern sind in Abbildung 2 schematisch skizziert und können als Grundlage für zukünftige Forschungsaktivitäten dienen. Diese generische Forschungsprogrammatisierung begleitet alle Phasen des Endlagers vom Auswahlverfahren bis zur Entlassung. Die Autoren gehen davon aus, dass damit eine Konzeption sequentieller Forschungsprogramme möglich sein wird. Die der anwendungsorientierten Grundlagenforschung zuzuordnende Methodenentwicklung und -validierung mit einem Fokus auf der Konzeption eines KI-gestützten Digital Twins kann dabei im Laufe der Zeit sukzessive von einer Phase der anwendungsnahen, standortspezifischen Forschung ergänzt werden. Darüber hinaus gehen die Autoren davon aus, dass die zukünftig vorgefundenen Gegebenheiten am Endlagerstandort aller Voraussicht nach Adaptionen der bis dahin implementierten KI-Methoden erfordern werden.

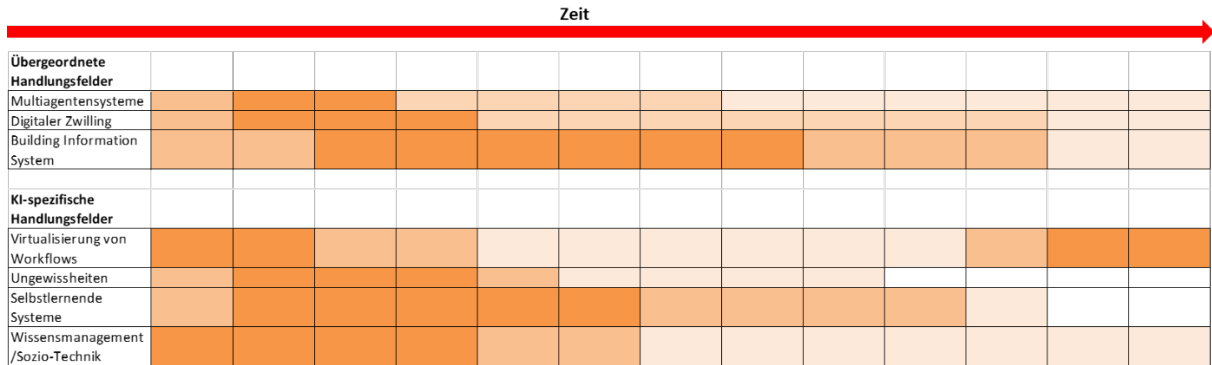
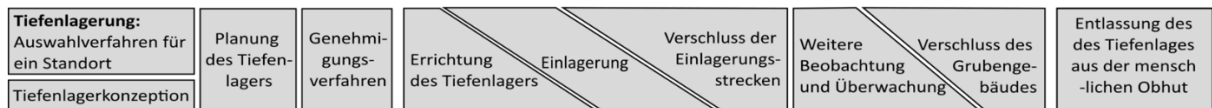


Abbildung 2: Schwerpunktaktivitäten innerhalb der Handlungsfelder in Bezug auf die unterschiedlichen Phasen der Endlagerentwicklung. Horizontal (von links nach rechts) ist die zeitliche Abfolge der geplanten endlagerbezogenen Handlungsfelder (orange / grau) über einen Zeitraum von Dekaden symbolisiert. In den unteren beiden Bereichen repräsentiert die Farbintensität die zeitbezogene Arbeitsintensität der entsprechenden Forschungsaktivitäten.

Literatur

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Exploring Semantic Technologies and Their Application to Nuclear Knowledge Management, Nuclear Energy Series No. NG-T-6.15, IAEA, Vienna (2021).
- [2] Edward Glaessgen, David Stargel, The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles, DOI: 10.2514/6.2012-1818, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 14th AIAA Conference (2012)
- [3] Michael Grieves, John Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in: Franz-Josef Kahlen, Shannon Flumerfelt, Anabela Alves (Herausgeber), Springer International Publishing, Print ISBN: 978-3-319-38754-3, Electronic ISBN: 978-3-319-38756-7, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (2017)
- [4] Jacques Ferber, Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence, Harlow: Addison Wesley Longman, Paper: ISBN 0-201-36048-9 (1999)
- [5] Katia P. Sycara, Multiagent Systems, AI Magazine Volume 19 Number 2 (1998)
- [6] J. Hegewald, M. Krafczyk, J. Tölke, A. G. Hoekstra and B. Chopard: An agent-based coupling platform for complex automata. In Marian Bubak, G. Dick van Albada, Jack Dongarra, and Peter M. A. Sloot, editors, ICCS (2), volume 5102 of Lecture Notes in Computer Science, pages 227–233. Springer (2008)
- [7] Succar, B., 2009. Building information modelling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction 18 (3), 357–375
- [8] <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>, zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [9] <https://www.nfdi.de/>, zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [10] <https://nfdi4ing.de/>, zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [11] <https://www.nfdi4earth.de/>, zuletzt verfügbar am 16.04.2021

- [12] <https://periodensystem-ki.de/Mit-Legosteinen-die-Kuenstliche-Intelligenz-bauen>, zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [13] https://de.wikipedia.org/wiki/Testgetriebene_Entwicklung, zuletzt verfügbar am 06.06.2021
- [14] Wilkinson, Mark D.; Dumontier, Michel; Aalbersberg, IJsbrand Jan; Appleton, Gabrielle; et al. (15 March 2016). "The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship". *Scientific Data*. 3: 160018. doi:10.1038/sdata.2016.18
- [15] §27 Absatz 2 des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG), vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328)
- [16] M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis, Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, Volume 378, 2019, Pages 686-707, ISSN 0021-9991, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999118307125>)
- [17] C. Lüdeling, K. Salzer, R.-M. Günther, A. Hampel, S. Yildirim, K. Staudtmeister, A. Gährken, J. Stahlmann, K. Herchen, K.-H. Lux, B. Reedlunn, S. Sobolik, F.D. Hansen & S.A. Buchholz (2018): WEIMOS: Joint project on further development and qualification of the rock mechanical modelling for the final HLW disposal in rock salt – Overview and first results on tensile stress modelling, in S. Fahland, J. Hammer, F.D. Hansen, S. Heusermann, K.-H. Lux & W. Minkley (Hrsg.): *The Mechanical Behavior of Salt IX, Proc. 9th Conference, Hannover, 12.-14. September 2018*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 978-3-9814108-6-0.
- [18] A. Hampel, R.-M. Günther, K. Salzer, C. Lüdeling, W. Minkley, A. Pudewills, S. Yildirim, K. Staudtmeister, R. Rokahr, A. Gährken, C. Missal, J. Stahlmann, K. Herchen, U. Düsterloh, K.-H. Lux, B. Reedlunn, J.G. Argüello & F.D. Hansen (2018): Joint Project III on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt – Modeling of the Temperature Influence on Deformation at WIPP, in S. Fahland, J. Hammer, F.D. Hansen, S. Heusermann, K.-H. Lux & W. Minkley (Hrsg.): *The Mechanical Behavior of Salt IX, Proc. 9th Conference, Hannover, 12.-14. September 2018*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 978-3-9814108-6-0.
- [19] White, M. (editor) (2013) MoDeRN Project Final Report
- [20] White, M. & Scourfield, S. (editors) (2019): Modern2020 Project Synthesis Repository Monitoring: Strategies, Technologies and Implementation. Deliverable D6.5
- [21] Jobmann (2019): Monitoring von Endlagern für hochradioaktive Abfälle mit Blick auf die Langzeitsicherheit und im Kontext der Partizipation (MONTANARA). Abschlussbericht. BGE TEC 2019-02
- [22] Stahlmann, J.; León Vargas, R.; Mintzlaff, V.; Epkenhans, I. (2018): Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung. ENTRIA-Arbeitsbericht-15
- [23] Mintzlaff, V.; León Vargas, R.; Epkenhans, I.; Stahlmann, J. (2018): Monitoring als Entscheidungsgrundlage für die Rechtfertigung über die Rückholung/Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig 104, S. 55-74.

- [24] Projektträger Karlsruhe (PTKA) Entsorgung (2020): BMWi geförderte FuE-Vorhaben zur „Entsorgung radioaktiver Abfälle“, Berichtszeitraum: 1. Januar - 30. Juni 2020. Verbundprojekt: Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland (TRANSENS), Teilprojekt A-J; S. 190-209. <https://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/downloads/ptka-wte-e/Fortschrittsbericht%20PTE-59.pdf>, zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [25] FKZ: 02 E 10498 und FKZ: 02 E 10890
- [26] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/projektfoerderprogramm-nukleare-sicherheitsforschung.html> zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [27] <https://www.iaea.org/newscenter/news/managing-nuclear-knowledge-with-semantic-technologies>, zuletzt verfügbar am 06.06.2021
- [28] <https://pytorch.org/> zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [29] <https://www.tensorflow.org/> zuletzt verfügbar am 16.04.2021
- [30] <https://www.iso.org/standard/70303.html> zuletzt verfügbar am 16.04.2021