

# Modelle simulieren die Zukunft

Michael Kühn<sup>1,2</sup>, Theresa Hennig<sup>1,2</sup>, Oliver Heidbach<sup>1,3</sup>, Magdalena Scheck-Wenderoth<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

<sup>3</sup> TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

<sup>4</sup> RWTH Aachen, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, Aachen

Modelle und Simulationen erlauben eine Prognose, wie sich Prozesse in der Geosphäre unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten in der Zukunft entwickeln. Sie sind die Grundlage, um Entwicklungsszenarien zu prüfen und darüber praktikable Entscheidungen treffen zu können. Nur so ist z. B. eine Quantifizierung potenzieller Radionuklidmigration im hydrogeologischen System des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und damit eine Bewertung des Rückhaltevermögens eines Endlagers für eine Million Jahre möglich.

Im Rahmen des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper fordert das Standortauswahlgesetz (StandAG, Anlage 2 zu § 24 Absatz 3): „Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs müssen mindestens über eine Mächtigkeit verfügen, die den sicheren Einschluss der Radionuklide über einen Zeitraum von einer Million Jahren bewirkt. Das voraussichtliche Einschlussvermögen soll möglichst hoch und zuverlässig prognostizierbar sein. Es ist unter Berücksichtigung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere mittels Modellrechnungen abzuleiten, sobald die hierfür erforderlichen geowissenschaftlichen Daten vorliegen, spätestens für den Standortvorschlag [...]“

Für diese zentrale Forderung des StandAG werden geologische Modelle benötigt, welche die statische, räumliche, dreidimensionale Struktur des Untergrunds

## Kernaussagen

- **Modelle und Simulationen** sind der einzige Weg, **Zukunftsszenarien und Hypothesen** zu testen und zu bewerten, wie sich ein Endlagerstandort über einen Zeitraum von einer Million Jahren entwickelt.
- **Geologische Strukturmodelle** sind **Annäherungen an die Wirklichkeit**, die auf Beobachtungen beruhen. Sie sind eine Veredelung gesteinspezifischer Daten, basierend auf fachlicher Expertise.
- **Geologisches, physikalisches und geochemisches Prozessverständnis** ist vorhanden. Die Methoden müssen auf die Endlagerstandortsuche **transformiert und angepasst** werden.
- **Der Grad der Zuverlässigkeit der Modelle** ist wichtig, um die Belastbarkeit der Ergebnisse beurteilen zu können. Und er liefert Hinweise, wo neue Daten erhoben werden müssen.

beschreiben und abbilden (Abb. 1). Sie beinhalten als Ausgangsbedingungen die Verteilung der physikalischen und chemischen Gesteinseigenschaften und bieten die Möglichkeit, mit Simulationen der natürlichen und anthropogenen Pro-

zesse die Veränderungen innerhalb des Geosystems zu quantifizieren. Hierfür ist eine Reihe unterschiedlicher Komponenten notwendig (Abb. 2). Ein geologisches Modell gibt die Struktur des Systems und die Verteilung der Eigen-

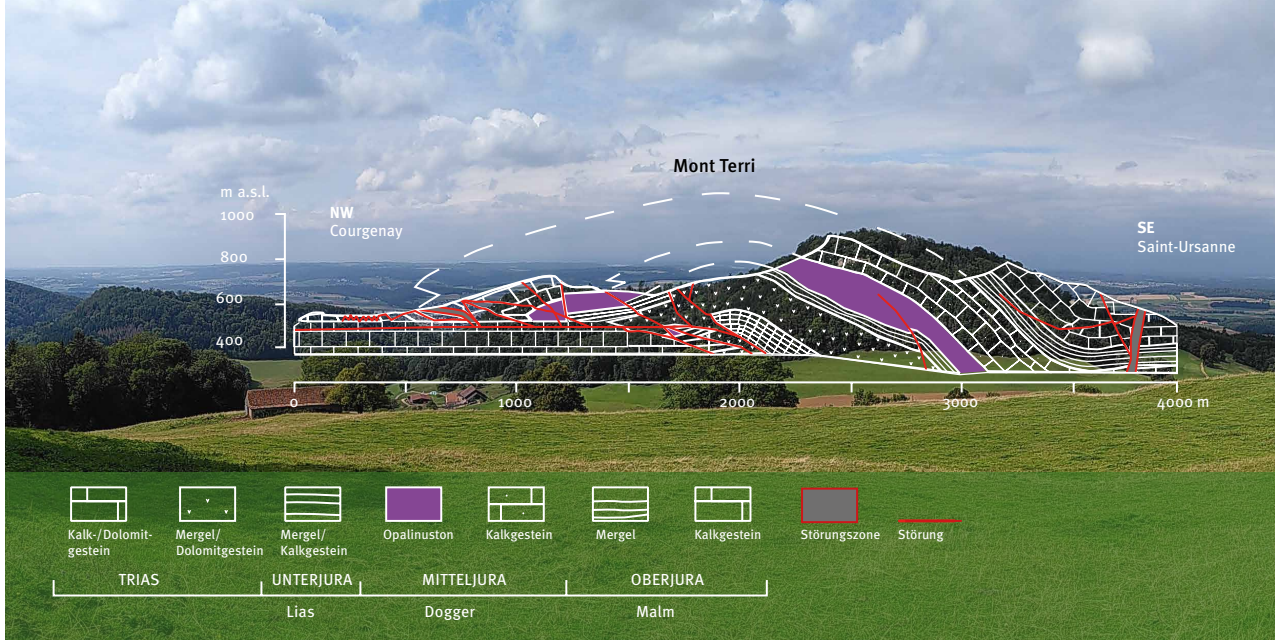


Abb. 1: Außenansicht und innere Struktur des Mont Terri (Schweiz), der das Untertagelabor für die Erforschung des Opalinustons als Wirtsgestein beherbergt (Foto: M. Kühn; Grafik: T. Henning, beide GFZ)

schaften des Untergrunds wieder. Dabei liefern die initialen Feldgrößen, wie z. B. das großräumige Spannungsfeld (Heidbach et al., 2021, S. 12 in diesem Heft) und die lokale Druck- und Temperaturverteilung die Startwerte für die eigentliche Aufgabe: die Beschreibung der Dynamik des Systems, also der Entwicklung in der Zukunft.

Je nach Fragestellung müssen dafür unterschiedliche Prozesse mit Hilfe der computergestützten Analyse berücksichtigt werden. Zunächst wird ein qualitatives Konzept entwickelt. Für die Quantifizierung ist als Vermittler das mathematische System mit allen notwendigen Gleichungen notwendig. Die Lösung der Gleichungen erfordert im letzten Schritt das numerische System (Abb. 2). Ott et al. (2021, S. 36 in diesem Heft) zeigen z. B. die Entwicklung der Erdoberfläche und der direkt darunter liegenden Horizonte durch Erosionsprozesse, um den Nachweis zu erbringen, dass die abdeckenden Schichten eines Endlagers für radioaktive Abfälle nicht vor einer Million Jahren abgetragen werden. Ein weiteres Beispiel zur Quantifizierung der Radionuklidmigration im Rahmen der Fragestellung, wie mächtig ein Wirtsgestein sein sollte, ist die geochemische Simulation, die im hinteren Teil dieses Beitrags vorgestellt wird.

Die Komplexität der natürlichen geologischen Systeme wird bereits beim Auf-

bau des geologischen Modells deutlich. Bei der Modellbildung müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden, sodass nur die Haupt- und Regelungsfaktoren berücksichtigt werden, welche die physikalischen oder hydro-geochemischen Prozesse steuern. In Anlehnung an den Aphorismus von Albert Einstein „Alles sollte so einfach wie möglich dargestellt werden, aber nicht einfacher“ können und müssen Modelle nicht vollkommene Kopien des realen Systems darstellen, um einen praktischen Nutzen zu generieren. Die Ergebnisse der Simulationen mit einem Modell sollten aber zumindest teilweise beobachtbar oder experimentell überprüfbar sein. Zhu und Anderson (2002) stellen fest, dass ein Modell verifiziert werden muss, d. h., es muss geprüft werden, ob der für die Simulation verwendete Computercode die Gleichungen korrekt löst und frei von schwerwiegenden Fehlern ist. Im Allgemeinen muss ein Simulationsprogramm nicht vom Anwender verifiziert werden, da dies die Aufgabe der Entwicklerinnen und Entwickler ist. Es muss aber validiert werden, ob das angenommene Modell, also die Gleichungen im Computercode (Abb. 2), die den betrachteten Prozess beschreiben, tatsächlich die zu untersuchenden natürlichen Prozesse ausreichend präzise beschreibt. Als Endprodukt des Modellierungsprozesses enthält ein Computermodell alle Vereinfachungen und Annahmen, die in der Summe aller Schritte gemacht wur-

den, insbesondere in der Anfangsphase, in der die Modelle zur geologischen Struktur und der Gesteinseigenschaften erstellt sowie die Ausgangsbedingungen definiert werden.

Geologische, physikalische oder hydro-geochemische Modelle ermöglichen es, Daten, Konzepte und Prozesse zu integrieren und zu verstehen. Allerdings basieren z. B. die Modelle des reaktiven Stofftransports von Radionukliden auf verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen. Dies erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit unter anderem der numerischen Mathematik, Geologie, Hydrologie, Physik und Chemie. Der beste Weg, um Fehler zu vermeiden, besteht darin, die eigenen Ergebnisse stets kritisch zu hinterfragen. Modelle und Simulationen sind die einzige Möglichkeit, Szenarien und Hypothesen zu testen, um belastbare Prognosen zu erstellen, und um zu bewerten, wie sich ein Endlagerstandort in der Zukunft entwickelt.

## Geologisches Modell als strukturelle Basis

Prozessmodelle enthalten sowohl zeitliche als auch räumliche Informationen, die mit ihrer Komplexität für Anwendungen in der realen Welt notwendig und erwünscht sind. Sie basieren strukturell auf den geologischen Modellen, welche die Geometrie des Gesamtsystems de-



Kontakt: Michael Kühn  
(michael.kuehn@gfz-potsdam.de)

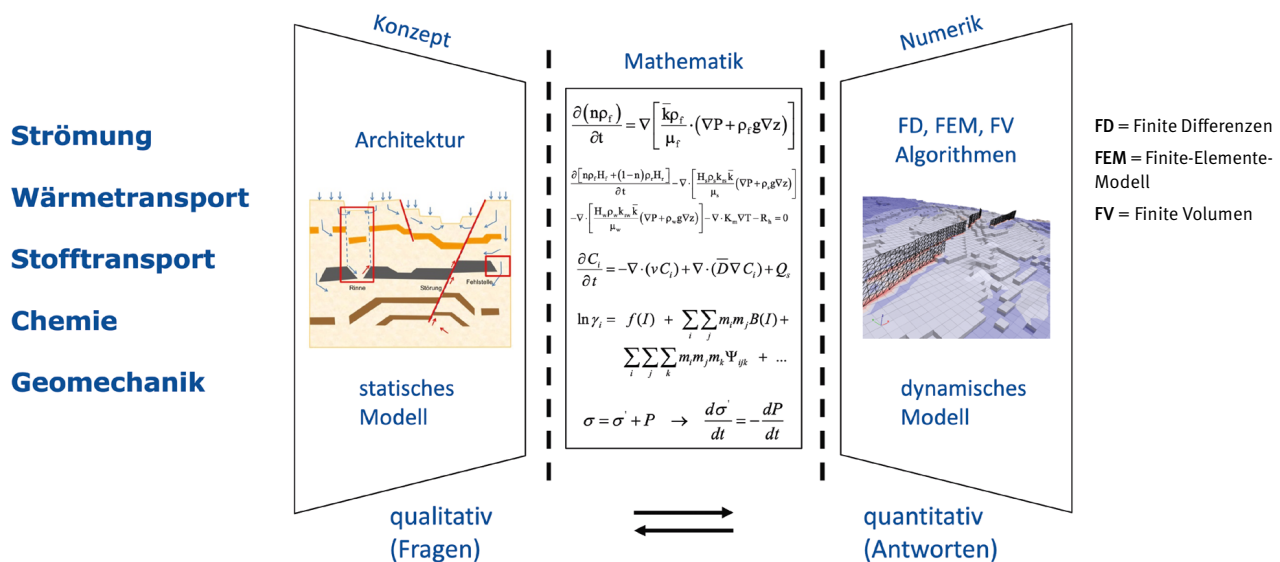


Abb. 2: Komponenten eines Geosystem-Modells: Architektur des statischen geologischen Modells, das mit seinen Eigenschaften auf Labordaten, Feldexperimenten und der Erkundung basiert. Das mathematische System dient als Vermittler zwischen dem qualitativen Konzept und den quantitativen Antworten der numerischen Lösung zur Simulation der natürlichen und anthropogenen physikalischen und chemischen Prozesse.

finieren. Grundlegende Prozesse (Abb. 2), die bei der gleichzeitigen und gekoppelten Simulation von Transport und Reaktion eine wichtige Rolle spielen, sind die Strömung der Fluide (Flüssigkeiten und Gase), der Wärmetransport (Energie), der Stofftransport (Substanzen und deren Sorption), chemische Reaktionen (Mineralumwandlung und radioaktiver Zerfall) und geomechanische Effekte (Deformation).

Statische geologische Modelle bilden die Basis für ein erfolgreiches Management des tiefen Untergrunds und um die dynamischen physikalischen und chemischen Prozesse in der Erdkruste zu verstehen. Die Eingangsdaten und Modellierungsmethoden richten sich nach der jeweiligen Zielsetzung. Generell gilt, dass die geologischen Modelle eine virtuelle Abfrage der Gesteinsarten und ihrer Eigenschaften ermöglichen.

Gesteine werden über Bohrungen gewonnen und dann geologisch, geophysikalisch und geochemisch untersucht. So ergeben sich über die Gesteinsanalysen des Bohrmaterials sogenannte Schichtenverzeichnisse. Sie werden für unterschiedliche Gesteinsarten aus einer Bohrung zu Einheiten zusammen-

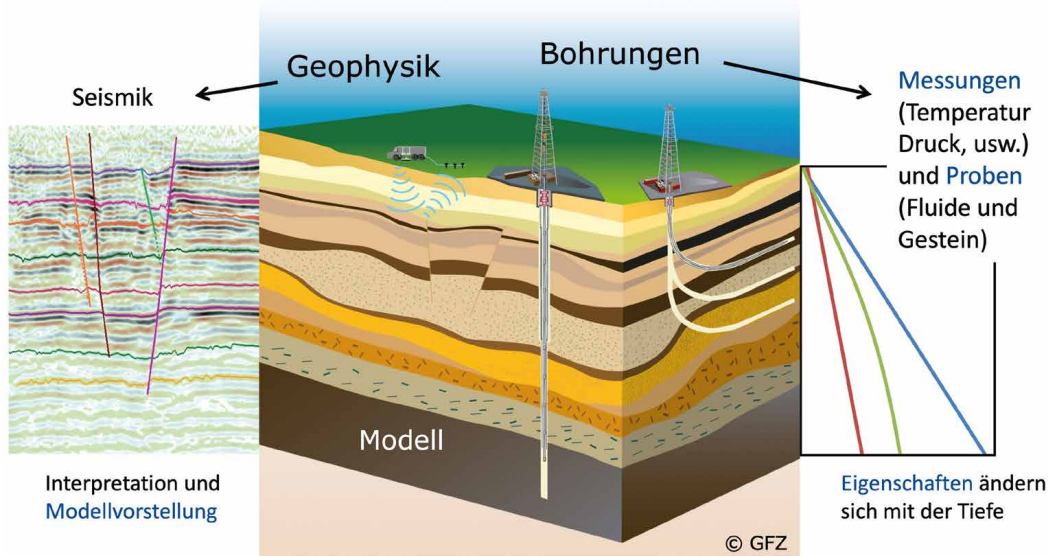
gefasst. Diese sind wiederum die Basis für Profilschnitte und geologische Karten. Bei der Modellerstellung fließen schrittweise alle verfügbaren Daten ein: Bohrungsdaten, geophysikalische Messungen sowie geologische Karten und Profilschnitte.

Die Erkundung des geologischen Untergrunds ist notwendig, damit dieser nachhaltig genutzt werden kann. Um die Struktur des Untergrunds abzubilden, werden geophysikalische Messmethoden eingesetzt (Abb. 3). Der Untergrund wird z. B. mit seismischen Signalen „durchleuchtet“ und so indirekt „tomografisch“ untersucht (Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Mit Hilfe von Bohrungen werden Wasser- und Gesteinsproben gewonnen, welche die Möglichkeit bieten, das geologische Modell zu prüfen und zu verfeinern und die Gesteinseigenschaften zuzuordnen (Genderjahn et al., 2021, S. 24 in diesem Heft). Feldgrößen wie Gebirgsspannung, Fluiddruck und Temperatur werden in der Tiefe direkt gemessen. Über die Kombination und gemeinsame Interpretation aller Messergebnisse ergibt sich so am Ende ein Abbild des geologischen Untergrunds und eine Beschreibung der Ausgangsbedingungen (Abb. 3). Nur mithilfe der

Geophysik erreichen die geologischen Modelle die notwendige dreidimensionale, räumliche Auflösung. Zur Finalisierung des geologischen Modells bedarf es am Ende aber auch noch fachlicher Expertise und hinreichende Erfahrung. Fachliche Expertise ist hier essenziell, hat aber auch zur Folge, dass das Ergebnis von der bearbeitenden Person abhängt. Daher ist auch die umfangreiche und vollständige Dokumentation für eine bestmögliche Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der geologischen Modelle unbedingt erforderlich. Darüber hinaus müssen sie fortschreibungsfähig sein, weil im Laufe des Standortauswahlverfahrens immer wieder zusätzliche Daten verfügbar sein werden, u. a. durch die Erhebung im Rahmen der obertägigen und folgenden untertägigen Erkundungen (Kühn et al., 2021, S. 6 in diesem Heft). Je mehr Informationen konsistent integriert werden, umso größer ist die Genauigkeit. Der wirkliche Mehrwert der geologischen Modelle entsteht dadurch, dass sie Vorhersagen für Gebiete erlauben, die weniger gut erkundet sind.

Dreidimensionale geologische Modelle sind der Schlüssel, um Standortregionen in den identifizierten Teilgebieten auszuweisen. Einerseits liefern die vorhan-





**Abb. 3:** Basierend auf verschiedenen Beobachtungstechnologien wird das geologische Modell des Untersuchungsgebiets erstellt. Direkte Messmethoden finden Anwendung in Bohrungen im Untergrund, aus denen Gesteins- und Fluidproben gewonnen werden (Genderjahn et al., 2021). Diese werden mit den Ergebnissen der indirekten Messmethoden, z. B. der Seismik (Lüth et al., 2021), kombiniert und interpretiert.

denen Bohrungen dafür die Fakten, andererseits stellen existierende Bohrungen aber auch ein Ausschlusskriterium bei der Endlagersuche nach dem Standortauswahlverfahren dar (Kühn et al., 2021). Es existiert eine weit entwickelte geophysikalische Methodik zur nichtinvasiven Erkundung des geologischen Untergrunds und der Integration des daraus generierten Wissens in die Modelle. Trotzdem wird eine Anpassung der Erkundungstechnologien notwendig sein, weil die bisherige Zielstellung der Erkundung des tieferen Untergrunds anderen Suchobjekten galt und die dabei explorierten spezifischen Gesteinsformationen grundlegend andere Eigenschaften besaßen, als die nun im Rahmen des Standortauswahlverfahrens in den Blick genommenen Wirtsgesteine. Dreidimensionale geologische Modelle stellen eine Veredelung von Daten dar und bilden eine wesentliche Entscheidungsgrundlage. Aus den gesammelten und erhobenen Daten werden Informationen extrahiert, welche in die Modelle überführt werden und am Ende eine Beurteilung mit Bezug zum Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ermöglichen.

### Simulation der Radionuklidmigration im Wirtsgestein

Im Rahmen der Forschungsarbeiten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ ist das folgende Beispiel entstanden. Es zeigt als Prozesssimulation eine Radionuklidmigration, also die mögliche Wanderung von radioaktivem Material aus dem Endlager durch das Wirtsgestein. Das Modell dazu schaut in die Zukunft und erlaubt eine Prognose, wie sich ein System bei gegebenen Ausgangsbedingungen über eine Million Jahre verhält. Beim Stofftransport von Radionukliden müssen gekoppelte physikalisch-chemische Prozesse in Raum und Zeit berücksichtigt werden. Zur zeitabhängigen Simulation dieser Prozesse wird als Basis das räumliche geologische Modell benötigt. Die hier vorgestellte Szenarienanalyse des Opalinustons wurde im Hinblick auf die Fragestellung durchgeführt, ob der einschlusswirksame Gebirgsbereich über eine ausreichende Mächtigkeit verfügt, die den Einschluss von Uran über einen langen Zeitraum garantiert. In Tonsteinen basiert das Konzept zur Lagerung hochradioaktiven Abfalls und der Isolierung der Radionuklide auf der extrem geringen Durchlässigkeit des

Gesteins für Gase und Flüssigkeiten, so dass der Transport nur durch Diffusion erfolgt, und zusätzlich auf dem Rückhaltevermögen, das sich aus der großen reaktiven Oberfläche darin enthaltener Tonminerale ergibt (Genderjahn et al., 2021).

Die Transporteigenschaften von Radionukliden werden in der Regel in Labor- oder In-situ-Experimenten unter geochemisch kontrollierten und konstanten Bedingungen bestimmt. Frühere numerische Studien haben für den Opalinuston am Mont Terri (Schweiz) aber gezeigt, dass die Uranmigration stark von Variationen in der Zusammensetzung des Porenwassers abhängt, die sich insbesondere aus der mineralogischen Heterogenität ergibt (Hennig et al., 2020; Hennig und Kühn, 2021). Die um das Wirtsgestein herum befindlichen Aquifere (Grundwasserleiter) stellen die hydrogeologischen Randbedingungen dar, zwischen denen sich geochemische Gradienten in dem über 200 m mächtigen, niedrig durchlässigen Tonstein (blaue Punkte, Abb. 4) durch diffusiven Austausch über Millionen von Jahren gebildet haben. Somit ist die Homogenität, wie in den Labor- und In-situ-

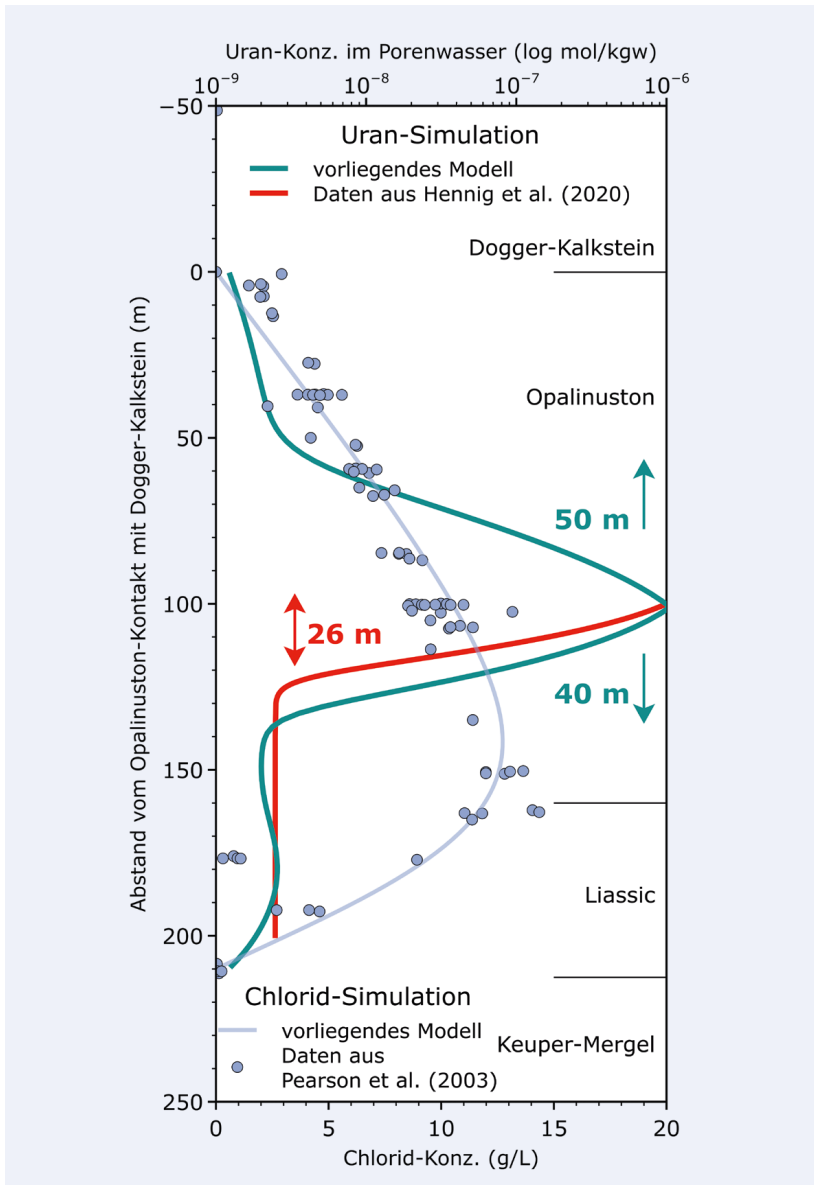


Abb. 4: Ergebnis der Modellierung der Radionuklidmigration im Opalinuston. Geochemische Gradienten im System des Mont Terri (blaue Punkte) verstärken die Uranmigration (grüne Linie) durch die Formation hindurch im Vergleich zur Simulation eines homogenen Systems (rote Linie). Das berechnete Chloridprofil (blaue Linie) stimmt mit Messdaten aus Bohrlochanalysen überein.

liert. Die Ergebnisse zeigen (grüne Linie, Abb. 4), dass Uran 50 m in Richtung des überliegenden Aquifers (Dogger) und 40 m in Richtung des darunter liegenden (Lias) migriert. Das bedeutet, dass sich im Vergleich mit einem homogenen System (rote Linie, Abb. 4), Uran wesentlich weiter durch die Formation bewegt, wenn geochemische Gradienten existieren.

Für die Erstellung geologischer Modelle und die darauf basierenden Prozesssimulationen ist die notwendige geologische, physikalische und geochemische Expertise vorhanden, erfordert aber in Teilen eine Transformation und Anpassung für die zu betrachtenden Szenarien und die Prüfung von Hypothesen im Rahmen der Endlagerstandortsuche. In diesem hier dargelegten Fall konnte gezeigt werden, dass das Uran innerhalb der theoretischen effektiven Rückhaltezone des Opalinustons verbleibt und angrenzende Grundwasserleiter nicht erreicht. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich wäre in diesem Fall eindeutig mächtig genug.

Experimenten angenommen, für die deutlich größere Ausdehnung der Wirtsgesteine nicht mehr zutreffend.

Mit eindimensionalen reaktiven Transportmodellen wurden unter Verwendung der Software PHREEQC (Parkhurst und Appelo, 2013) zunächst die heutigen Porenwasserprofile auf Grundlage der geologischen Entwicklung des Mont Terri simuliert. Das geologische Modell gibt vor, dass der Opalinuston zwischen triassischen und jurassischen Kalksteinen, Mergeln und Schiefer eingebettet ist. Die Süßwasserinfiltration in die den Tonstein umgebenden Aquifere und damit die Aktivierung des hydrogeologischen

Systems erfolgte erst nach Hebung des gesamten Komplexes während der Aufaltung des Juragebirges und der nachfolgenden Erosion. Die Ausgangsbedingungen wurden entsprechend der geologischen Entwicklung definiert. Das reaktive Transportmodell wurde mit Hilfe des an Feldproben gemessenen Chloridprofils kalibriert (blaue Punkte, Abb. 4). Weiterhin wurde die Uranmigration ausgehend von einer Quelle, die sich in der Mitte des gering durchlässigen Abschnitts mit dem Opalinuston befindet und ein potenzielles Endlager abbildet, für eine Million Jahre unter Berücksichtigung des geochemisch heterogenen Systems simu-

### Integrierte Beurteilung der Ergebnisse

Die geologischen Strukturmodelle und Ausgangsbedingungen dienen als unabdingbare Berechnungsgrundlage für Prozesssimulationen für die Konzeption, Planung und Prognose komplexer Systeme. In einem dreidimensionalen Modell werden alle Erkundungsdaten zusammen dargestellt und ausgewertet. Daraus resultiert eine schlüssige Definition des unterirdischen Raums und es können Modelle für die Simulation physikalischer und chemischer Prozesse über die Zeit abgeleitet werden. Das ist die einzige Möglichkeit, um die Barriere-

## ” Geologische, physikalische, hydro-geochemische Systeme befinden sich zu keiner Zeit in einem stationären Zustand.

wirkung eines Wirtsgesteins für einen Zeitraum von einer Million Jahren zu prognostizieren.

Geologische, physikalische, hydrogeochemische Systeme befinden sich zu keiner Zeit in einem stationären Zustand, sondern sie durchlaufen fortwährend verschiedene Prozesse und Veränderungen. Daher liefert die Berechnung eines geochemischen oder reaktiven Transportmodells nicht nur Ergebnisse, sondern auch Ungewissheit über die Genauigkeit dieser Ergebnisse. Die Ungewissheit ist ein integraler Bestandteil der Modellierung und Simulation, der ebenso wichtig ist, wie jeder andere Aspekt einer Studie. Der Einsatz von Computern hat verschiedene unerwünschte Effekte, die beurteilt und gegebenenfalls eliminiert oder reduziert werden müssen:

- Es können numerische Probleme im Programmcode selbst auftreten,
  - die physikalischen und chemischen Phänomene sind ggf. nur unvollständig verstanden,
  - die geologischen Eingangsdaten sind immer zu einem gewissen Grad ungenau,
  - experimentell bestimmte Basisdaten unterliegen ebenfalls einem Messfehler und
  - es können Daten fehlen, die für den Aufbau eines Modells benötigt werden.
- die Integration aller räumlichen und zeitlichen Aspekte,
  - ein vertieftes Verständnis der beteiligten physikalischen und chemischen Prozesse (Strömung, Wärme, Transport, chemische Reaktionen, Mechanik) und
  - eine Verbesserung der Möglichkeiten bei der Erkundung, Nutzung und dem Schutz des unterirdischen Raums.

Nun wäre die Frage möglich: Wozu überhaupt Modelle und Simulationen verwenden, wenn ihnen nur begrenzt vertraut werden kann? Ihre unbestreitbaren Vorteile:

- Modelle sind der einzige Weg, um belastbare Prognosen zu erstellen, und zu bewerten, wie sich ein Endlagerstandort in der Zukunft entwickeln wird,

Die Frage muss also lauten: Wie genau müssen die Modelle für die Endlagerstandortsuche sein, um belastbare, robuste Ergebnisse zu erzeugen? Je mehr qualitativ hochwertige, mit Fachexpertise analysierte und interpretierte Daten zur Verfügung stehen, desto genauer und zuverlässiger werden die Vorhersagen. Letztendlich ist daher zu klären, welche Daten wo gebraucht werden, um die Ungewissheiten der Modelle auf ein Niveau zu senken, dass eine ausreichende Verlässlichkeit für zukünftige Entwicklung eines Endlagerstandorts erlaubt.

### Literatur

- Genderjahn, S., Schleicher, A. M., Schuster, V., Mitzscherling, J., Wagner, D., Rybacki, E., Dresen, G. (2021). Gesteinseigenschaften geben den Ton an. *System Erde*, 11 (2), 24–29. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.4>
- Heidbach, O., Ziegler, M., Morawietz, S., Reiter, K., Röckel, L., Cotton, F. (2021). Standortsuche im Spannungsfeld. *System Erde*, 11 (2), 12–17. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.2>
- Hennig, T., Kühn, M. (2021). Potential Uranium Migration within the Geochemical Gradient of the Opalinus Clay System at the Mont Terri. *Minerals*, 11 (10). <https://doi.org/10.3390/min11101087>
- Hennig, T., Stockmann, M., Kühn, M. (2020). Simulation of diffusive uranium transport and sorption processes in the Opalinus Clay. *Applied Geochemistry*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104777>
- Kühn, M., Heidbach, O., Heumann, A., Zens, J. (2021). Nadeln im Heuhaufen. *System Erde*, 11 (2), 6–11. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.1>
- Lüth, S., Esefelder, R., Richter, H., Jaksch, K., Schwarz, B., Wawerzinek, B., Giese, R., Krawczyk, C. M. (2021). Licht ins Dunkel bringen. *System Erde*, 11 (2), 18–23. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.3>
- Ott, R. F., Gailleton, B., Malatesta, L. C., Becker, L., Braun, J. (2021). Stabilität über eine Million Jahre. *System Erde*, 11 (2), 36–41. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.6>
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J. (2013). *Description of input and examples for PHREEQC version 3 : a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. <http://purl.fdlp.gov/GPO/gp037078>
- Zhu, C., Anderson, G. (2002). *Environmental applications of geochemical modeling*. Cambridge Univ. Press. [http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage/2010/06/04/file\\_2/3790444.pdf](http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage/2010/06/04/file_2/3790444.pdf)