

Standortsuche im Spannungsfeld

Oliver Heidbach^{1,2}, Moritz Ziegler¹, Sophia Morawietz^{1,2}, Karsten Reiter³, Luisa Röckel⁴, Fabrice Cotton^{1,5}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

³ TU Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Darmstadt

⁴ Institut für Angewandte Geowissenschaften, KIT, Karlsruhe

⁵ Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

Das gegenwärtige Spannungsfeld der Erdkruste ist eine zentrale Feldgröße für die Beurteilung der Stabilität eines Endlagers. Erreichen die Spannungen einen kritischen Wert, dann versagt das Gestein. Es bilden sich Risse und Brüche, die Wegsamkeiten für Flüssigkeiten und Gase darstellen. Als Folge kann das Endlager undicht werden. Im direkten Bezug dazu stehen die Ausschlusskriterien seismische Aktivität und aktive Störungszonen aus dem Standortauswahlgesetz. Beide sind ein Ausdruck dafür, dass der kritische Wert überschritten wurde.

Die Beschreibung des gegenwärtigen, natürlichen, also ungestörten Spannungszustands der Erdkruste ist für die Suche eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle von großer Bedeutung. Damit kann prognostiziert werden, wieviel Spannungsänderungen in der Zukunft aufgenommen werden können, ohne einen kritischen Zustand zu erreichen. Diese Spannungsänderungen sind zum einen vom Menschen verursacht, z. B. durch Bohrungen, Kavernenbau, oder die Lagerung der wärmeabstrahlenden Behälter mit den radioaktiven Abfällen. Zum anderen ändern auch natürliche Prozesse, wie z. B. Erdbeben, Eiszeiten und Erosion (Ott et al., 2021, S. 36 in diesem Heft), den Spannungszustand. Da die Stabilität eines geologischen Tiefenlagers zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen für die Standortauswahl entscheidend für den Schutz von Mensch und Umwelt ist, analysiert und bewertet das

Kernaussagen

- **Das gegenwärtige Spannungsfeld der Erdkruste** ist eine entscheidende Feldgröße zur Beurteilung, ob ein Standort als Endlager geeignet ist. Hochauflösende geomechanisch-numerische Modelle spielen hierbei eine zentrale Rolle.
- **Ungewissheiten** der Modelle zum gegenwärtigen Spannungszustand der Erdkruste müssen bestimmt und mit intelligenten Beprobungsstrategien durch Bohrungen reduziert werden.
- **Das Ausschlusskriterium seismische Aktivität** ist in seiner momentanen Formulierung nicht zielführend und muss durch einen physikbasierten Ansatz ersetzt werden.

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Daten zum Spannungsfeld und stellt diese in öffentlich zugänglichen Datenbanken bereit (Heidbach et al., 2018; Morawietz et al., 2020). Weiterhin werden am GFZ Methoden und Konzepte entwickelt, um aus den punktuellen Informationen mit Computersimulationen

eine kontinuierliche Beschreibung des gegenwärtigen Spannungsfelds im dreidimensionalen Raum zu erstellen (Ziegler und Heidbach, 2020). Ziel ist dabei auch, eine Vorhersage der zu erwartenden Spannungsänderungen durch natürliche und anthropogene Eingriffe zu treffen.

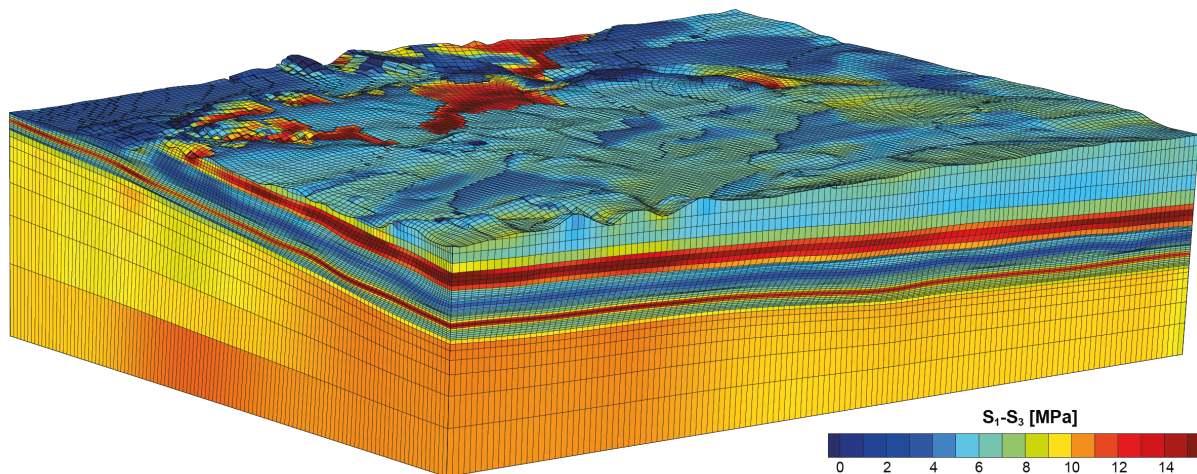


Abb. 1: Computermodell der 3D-Spannungsverteilung. Dargestellt ist die Differenzspannung in einem Volumen von $10 \times 10 \times 2,5 \text{ km}^3$. Blaue Farben verdeutlichen eine geringe Differenzspannung, welche z. B. in tonreichen Schichten vorherrscht. Höhere Differenzspannungen, sichtbar durch die rote Farbe, herrschen in den festen Schichten, wie z. B. dem Malm oder unteren Muschelkalk.

Kritische Spannungen und Computermodelle

Erreichen die Spannungen einen kritischen Wert, dann versagt das Gestein und es entstehen neue Brüche oder präexistierende tektonische Störungen werden reaktiviert. Beide Vorgänge können kriechend geschehen oder abrupt. Im zweiten Fall kommt es zu Erdbeben, deren Magnitude im Wesentlichen von der Länge der Brüche und Störungen sowie dem relativen Versatz entlang dieser bestimmt werden. Natürliche Erdbeben finden an präexistierenden Störungen statt, da es leichter ist, diese zu reaktivieren, als in einem intakten Gestein einen Neubruch zu erzeugen.

Für die Reaktivierung und den Neubruch ist die sogenannte Differenzspannung, also der Unterschied zwischen der größten und kleinsten Hauptspannung, entscheidend. Die Hauptspannungen wiederum kann man sich als drei senkrecht zueinanderstehende Kraftvektoren vorstellen. Sind alle gleich groß, dann findet keine Deformation statt. Wie stark in der oberen Erdkruste Gesteine deformiert werden und wie groß die Differenzspannungen sind, wird in erster Näherung

durch die elastischen Eigenschaften der Gesteine und den wirkenden Kräften, also der Schwerkraft und den Oberflächenkräften, die durch die Bewegung der tektonischen Platten erzeugt werden, bestimmt.

Zur Prognose des Spannungszustands im Untergrund werden 3D geomechanisch-numerische Computermodelle auf der Basis gemessener Daten gerechnet. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer solchen Modellierung für die oberen 2 km in der Molasse des Schweizer Voralpenlands (Hergert et al., 2015). Die einzelnen Sedimentschichten besitzen unterschiedliche elastische Eigenschaften. Diese bewirken eine große Variabilität der resultierenden Differenzspannungen zwischen den mechanisch festen Schichten aus Kalkstein, wie z. B. dem Malm und unteren Muschelkalk (rote Farben) und den „weicheren“ tonreichen Schichten des Doggers (blaue Farben).

Von zentraler Bedeutung für das Reaktivierungspotenzial präexistierender Störungen ist deren Orientierung im Spannungsfeld. Für intaktes Gestein ist dessen Festigkeit der entscheidende Parameter. Ist die Gesteinsfestigkeit bzw.

der Reibungskoeffizient einer präexistierenden Störung bekannt, kann das Versagens- bzw. Reaktivierungspotenzial als ein Wert zwischen null und eins dargestellt werden. Null bedeutet, der Zustand ist sehr weit vom Versagen und Neubruch entfernt; der Wert eins zeigt an, dass ein Bruch bzw. eine Reaktivierung stattfindet (siehe Abb. 2 unten).

Die wesentlichen Parameter, die benötigt werden, um die Kritikalität des Spannungszustands zu quantifizieren sind 1) die Lage und Orientierung von präexistierenden Störungen im Raum, 2) die Beschreibung der räumlichen Variabilität des ungestörten, natürlichen Spannungszustands, 3) das Versagenskriterium, d. h. wieviel Spannung das Gestein aufnehmen kann, bevor sich Brüche bilden oder eine Reaktivierung von präexistierenden Störungen stattfindet. Hinzu kommt 4) die Beschreibung der natürlichen und vom Menschen verursachten Prozesse, die Spannungsänderungen zur Folge haben, wie der Bau von Stollen und Schächten, aber auch der Wärmeeintrag durch die Behälter.

Störungen im Untergrund können z. B. mittels 3D-Seismik detektiert werden



Kontakt: Oliver Heidbach
(oliver.heidbach@gfz-potsdam.de)

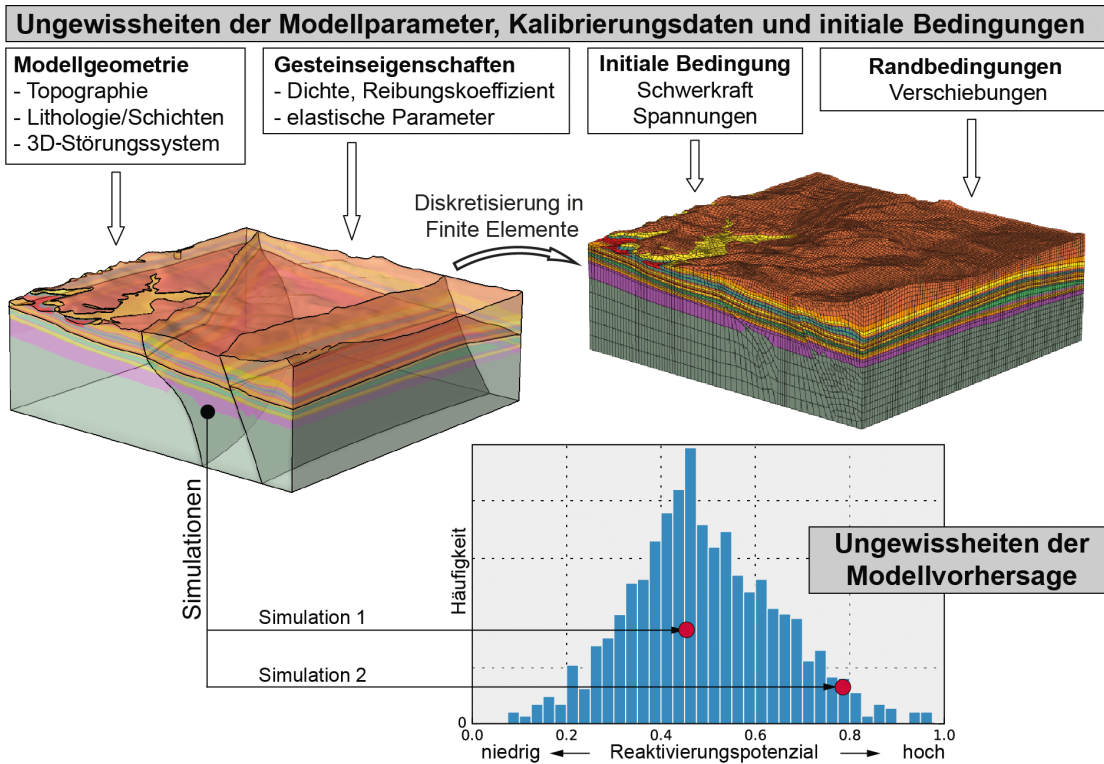


Abb. 2: Wesentliche Eingabegrößen eines geomechanisch-numerischen Modells zur Beschreibung des 3D-Spannungsfelds. Initiale und Randbedingungen werden variiert, bis die Modellergebnisse bestmöglich an punktuell vorliegende Spannungsdaten aus Bohrlochinformationen angepasst sind. Das Histogramm zeigt die Verteilung aller Simulationen des Modells in Bezug auf das Reaktivierungspotenzial präexistierender Störungen, wenn der Modellparameterraum untersucht wird. Sind die Ungewissheiten des Modells hoch, so ist das Histogramm breit und die Vorhersage hat eine niedrige Präzision (Abb. 3). Die roten Punkte zeigen die Vorhersage von zwei einzelnen Simulationen.

(Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Die Gesteinsfestigkeit und die elastischen Eigenschaften werden z. B. im Labor an Proben bestimmt oder von seismischen Messungen abgeleitet. Zur Quantifizierung der Spannungsänderungen werden thermisch-hydraulisch-mechanische Modelle verwendet (Kühn et al., 2021, S. 30 in diesem Heft). Eine Herausforderung ist die quantitative Beschreibung des natürlichen Spannungszustands. Hierzu werden 3D geomechanisch-numerische Modelle eingesetzt, die auf einem statischen geologischen Modell des Untergrunds basieren, in dem die Strukturen und die Verteilung der Gesteinseigenschaften beschrieben werden. Die physikalische Gleichung, die dieses Problem beschreibt, ist die des Kräftegleichgewichts zwischen der Schwerkraft und Oberflächenkräften der Plattentektonik. In der Regel ist die Verteilung der Gesteinseigenschaften inhomogen und anisotrop, sodass eine

Lösung der Gleichung nur mit numerischen Methoden, die eine Näherungslösung liefern, möglich ist. Hierfür bietet sich die Methode der Finiten Elemente an, da hiermit auch komplexe geologische Strukturen im Untergrund abgebildet werden können. Abbildung 2 fasst die wesentlichen Eingabegrößen einer solchen Modellierung zusammen und zeigt den Transfer der Geometrie zu einem Finite-Elemente-Gitter.

Ungewissheiten der Modellvorhersage

Um die Zuverlässigkeit einer Modellvorhersage einschätzen zu können, müssen die Ungewissheiten der Vorhersage bestimmt werden. Abbildung 3 verdeutlicht, dass hierzu eine einzelne Lösung eines Modells (roter Punkt), die man erhält, wenn alle Modellparameter festgelegt werden und eine bestmögliche Anpas-

sung an Kalibrierungsdaten vorliegt, nicht ausreicht. Der grüne Punkt in Abb. 3 ist das gesuchte Modellergebnis, das die wahre Beschreibung der Realität liefern würde. Die weißen Punkte sind verschiedene Simulationen des Modells, also Modelle, die mit unterschiedlichen Modellparametern im Rahmen ihrer Unsicherheiten gerechnet werden und somit eine Streuung der Modellergebnisse erzeugen. Die Aussagekraft von einem einzelnen Modellergebnis ist gering, da nicht bekannt ist, wie weit es vom wahren Ergebnis entfernt ist. Wenn tausende Simulationen gerechnet werden, ergibt sich eine Streuung, die idealerweise um das wahre Ergebnis verteilt ist; in diesem Fall ist die Richtigkeit des gewählten Modells hoch (Abb. 3a, b). Um die Streuung, also die Präzision der Modellergebnisse, zu verbessern, müssen die Ungewissheiten des Modells reduziert werden – die Genauigkeit nimmt zu und die Breite des Histogramms nimmt

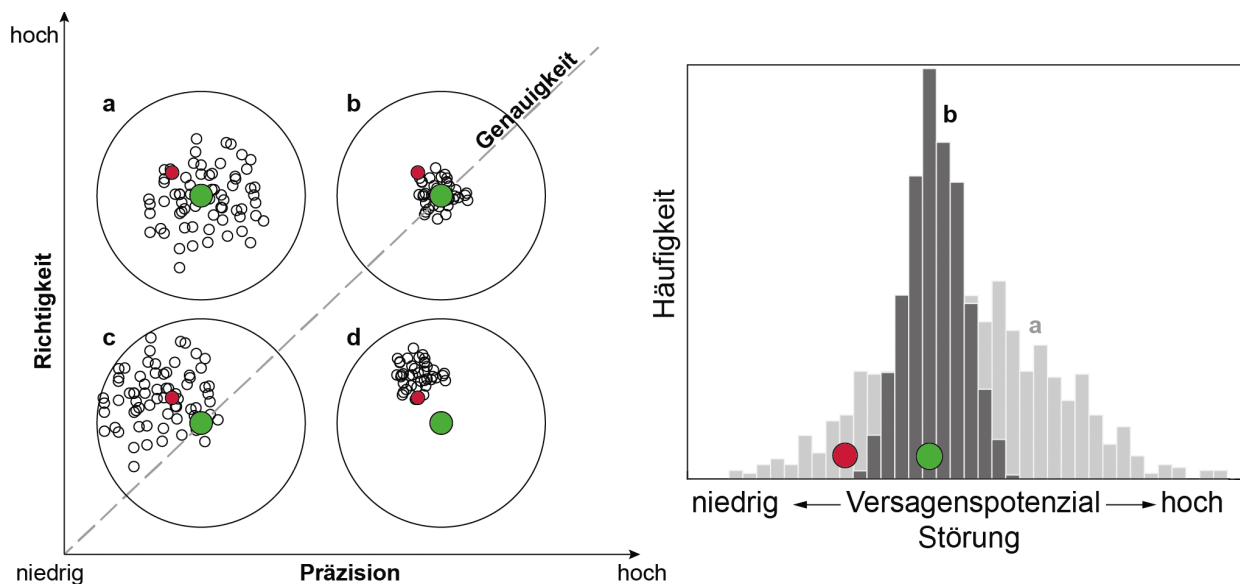


Abb. 3: Durch Variation der Modellparameter erhält man eine Vielzahl von Modellergebnissen (Simulationen). Eine einzelne Simulation (roter Punkt) sagt wenig darüber aus, wie zuverlässig das Modell ist. Werden viele Simulationen dargestellt, sollte sich eine Verteilung um den wahren, aber unbekanntem Wert (grüner Punkt) ergeben. Eine hohe Präzision und hohe Richtigkeit ergeben eine hohe Genauigkeit der Modellvorhersage. Die beiden Histogramme zeigen Verteilungen mit geringer (hellgrau) und höherer (dunkelgrau) Präzision.

ab, wie für die Fälle a und b in Abb. 3 gezeigt, da die Streuung der Modellergebnisse verringert wurde.

Um eine hohe Präzision der Modellvorhersage des natürlichen gegenwärtigen Spannungszustands zu erhalten, müssen im betrachteten Modellvolumen an genügend Punkten Daten zum Spannungszustand aus Bohrlochmessungen vorliegen, an die das Modell angepasst wird (Hergert et al., 2015). Je mehr Daten mit hoher Zuverlässigkeit im Modellvolumen vorliegen, desto genauer und somit zuverlässiger ist die Vorhersage der kontinuierlichen Beschreibung des 3D-Spannungsfelds (Ziegler und Heidbach, 2020).

Die größten Herausforderungen der Modellierung sind dabei nicht die numerischen Werkzeuge oder die Rechenleistung, sondern die Verfügbarkeit von zuverlässigen Daten. Dies gilt insbesondere für die Gesteinseigenschaften und deren räumliche Verteilung im Untergrund und, noch wichtiger, Daten zum Spannungsfeld aus Bohrungen, um das Modell an diese anzupassen (Morawietz et al., 2020; Heidbach et al., 2018; Reiter et al., 2015). Nur wenn diese Daten in

ausreichender Qualität und Anzahl zur Verfügung stehen, können die Ungewissheiten der Modellvorhersage auf ein für einen Endlagerstandort ausreichendes Niveau reduziert werden. Da die Kosten der Bohrungen hoch sind, müssen im Vorfeld intelligente Beprobungsstrategien entwickelt werden, um herauszufinden, wie viele Bohrungen an welchen Stellen notwendig sind. Erste Strategien werden derzeit am GFZ entwickelt und können in Zukunft mit Bohrlochdaten aus der Endlagerstandortsuche in der Nordschweiz getestet werden.

Ausschlusskriterium seismische Aktivität

Das Reaktivierungspotenzial von Störungen und die daraus resultierenden Erdbeben können die Standortsicherheit eines Endlagers beeinträchtigen. Um dies auszuschließen, sind im Standortauswahlgesetz in § 22 die zwei Ausschlusskriterien „aktive Störungszonen“ und „seismische Aktivität“ definiert. Das erste soll Gebiete ausschließen, in denen Bewegung an Störungen in den vergangenen 34 Millionen Jahren stattgefunden haben und somit die Barrierewirkung

beeinträchtigen könnten. Dies setzt voraus, dass diese Störungen vollständig in einem potenziellen Standortgebiet erfasst sind. Das zweite Kriterium soll die potenzielle Schadenswirkung durch Erdbeben auf einen Endlagerstandort ausschließen. Es werden daher Gebiete ausgeschlossen, in denen die seismische Gefährdung größer ist, als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01.

Allerdings ist der Kontext, in dem die Einteilung Deutschlands in Erdbebenzonen im genannten Nationalen Anhang (NA 2011-01) zur Baunorm erfolgt, die Bereitstellung von Lastannahmen aufgrund seismischer Wellen für normale Hochbauten an der Erdoberfläche (Grünthal et al., 2018). Innerhalb der Erdbebenzonen gelten Bodenbeschleunigungen in m/s^2 , die an der freien Erdoberfläche mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % innerhalb von 50 Jahren, d. h. der typischen Standzeit normaler Hochbauten, erwartet werden. Diesem Gefährdungsniveau entspricht eine mittlere Wiederholungsperiode dieser erwarteten Bodenbeschleunigungen von 475 Jahren. Bei oberirdischen kerntechnischen Anlagen

” Eine Spannungsgefährdungskarte Deutschlands führt die Ausschlusskriterien aktive Störungszonen und seismische Aktivität zusammen.

werden ebenfalls 50 Jahre Standzeit angenommen, aber die zu verwendenden Überschreitenswahrscheinlichkeiten von Erdbeben liegen um Größenordnungen niedriger, um auch extrem unwahrscheinliche Erdbeben zu berücksichtigen. Praktisch heißt das, dass für oberirdische kerntechnische Anlagen Bodenbeschleunigungen von extrem selten auftretenden Erdbeben berücksichtigt werden müssen, um die Sicherheit der Anlagen zu gewährleisten.

Da jedoch die Grundlage der Heranziehung von Baunormen zum erdbebenberechtigten Konstruktionsentwurf stets Bodenbeschleunigungen seismischer Wellen an der freien Erdoberfläche sind, ist die Herangehensweise im Ausschlusskriterium seismische Aktivität, also die Verwendung der Erdbebenzonen für die untertägigen Bereiche eines Endlagers, ungeachtet der gewählten Überschreitenswahrscheinlichkeiten, im Grundsatz falsch. Das Endlager liegt unter der Erde, sodass die Wirkung von seismischen Wellen eine ganz andere ist, als an der freien Erdoberfläche. Die Amplituden der seismischen Wellen halbieren sich im Gegensatz zu denen an der freien Oberfläche. Hinzu kommt, dass Bauwerke untertage im Gegensatz zu einem Gebäude an der Erdoberfläche nicht frei schwingen können, da sie von Gestein umgeben sind. Daher werden die Erdbebenzonen auch in anderen Ländern nicht als Kriterium für die Standortsuche verwendet.

Die eigentliche seismische Gefährdung ist nicht die Bodenbewegung, sondern sind die Spannungsänderungen, die von

Erdbeben in der Nähe eines potenziellen Endlagerstandorts hervorgerufen werden. Hinzu kommt die direkte Wirkung der seismischen Welle, also die dynamische Spannungsänderung. Für beide Fragen ist die Quelle, also die Lage und Größe des Erdbebens und dessen Abstrahlcharakteristik, von großer Bedeutung, um die möglichen Auswirkungen auf die Integrität eines Endlagers zu beurteilen. Das entscheidende Kriterium, das auch die Gefährdung durch Erdbeben und ihren Wirkungen im Untergrund einschließt, besteht in der Einhaltung einer kritischen, nicht zu unterschreitenden Distanz zu aktiven tektonischen Störungen, was mit dem zweiten Ausschlusskriterium aktive Störungszonen bereits aufgegriffen wird. Wie groß diese kritische Distanz zu Störungen, an denen Erdbeben stattfinden könnten, sein muss und ob alle maßgeblichen aktiven Störungszonen bekannt und ausreichend präzise kartiert sind, ist hierbei eine entscheidende und zu klärende Frage. Ebenso muss abgeschätzt werden, wie die Störung im Spannungsfeld orientiert ist, sodass probabilistisch abgeschätzt werden kann, welches maximale Erdbeben an einer Störung zu erwarten ist und welche Auswirkung dieses Erdbeben auf einen Endlagerstandort hat.

Ausblick – Eine Spannungsgefährdungskarte für Deutschland

Da aktive tektonische Störungen die Quelle von Erdbeben sind, können die beiden Ausschlusskriterien seismische Aktivität und aktive Störungszonen nicht

unabhängig voneinander betrachtet werden. Der Erdbebenkatalog für Deutschland gibt Aufschluss darüber, wo die seismische Aktivität hoch ist. Der Katalog basiert auf knapp 100 Jahren instrumenteller Beobachtungen sowie auf Berichten von Schäden durch Starkbeben der vergangenen 1000 Jahre (Grünthal und Wahlström, 2012). Letztere sind mit großen Unsicherheiten in Magnitude und Lage behaftet. Daher ist es nicht möglich vorherzusagen, wo in den nächsten eine Million Jahren Erdbeben mit welcher Magnitude auftreten. Es ist jedoch möglich, probabilistische Abschätzungen vorzunehmen und diese mit der Orientierung der bekannten Störungen und der Orientierung des Spannungsfelds zu verknüpfen. Hieraus kann eine Spannungsgefährdungskarte entwickelt werden, welche die Wahrscheinlichkeit vorher zu definierender statischer und dynamischer Spannungsänderungen beinhaltet. Wie wahrscheinlich ein einzelnes Szenario ist, kann aus einer einzelnen Simulation, wie sie als Beispiel in Abb. 4 gezeigt wird, nicht bestimmt werden. Hierzu sind tausende notwendig, die sich durch die Variation der Modellparameter und Modellannahmen unterscheiden. Diese Ensembles von Simulationen können mit etablierten statistischen Methoden bewertet werden; der Transfer, d. h. die Kombination beider Welten, also der Deterministik und Probabilistik, ist eine Herausforderung für zukünftige Forschungsarbeiten zur „Erdbebengefährdung und dynamischen Risiken“ am Deutschen Geoforschungszentrum GFZ.

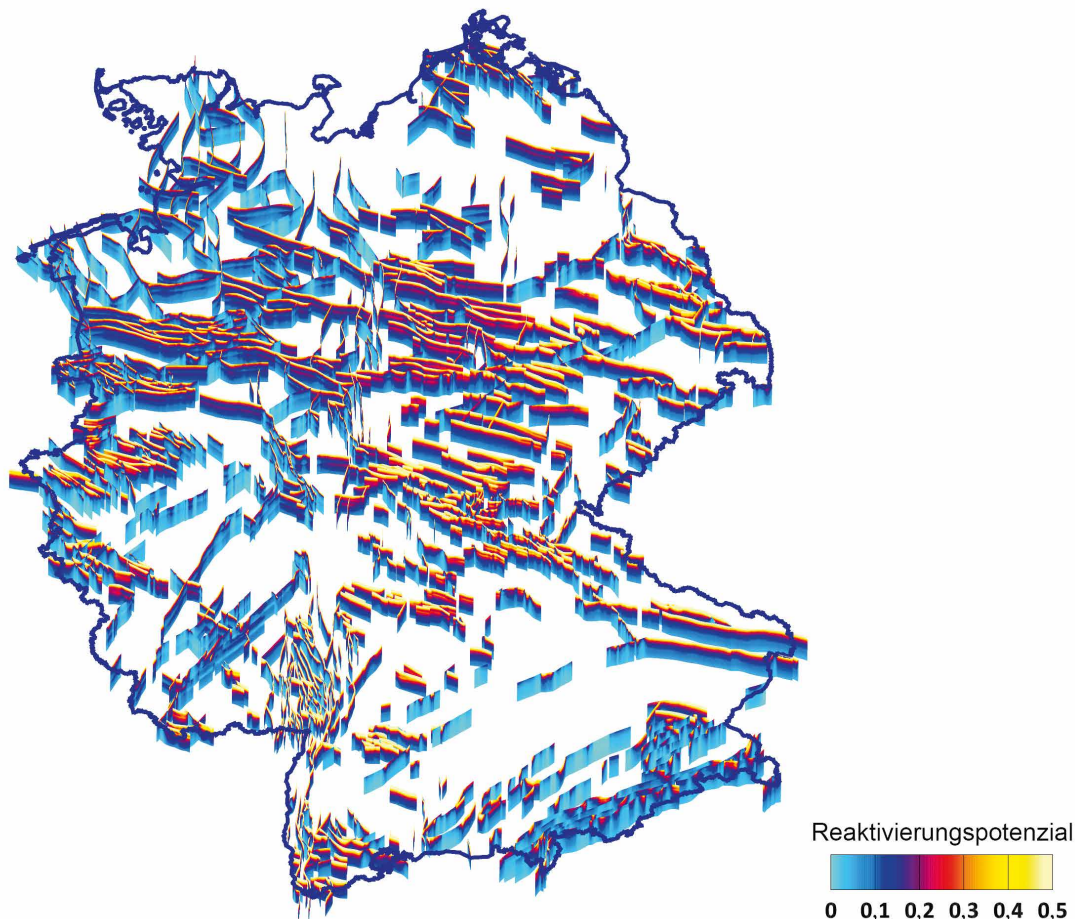


Abb. 4: Umrechnung einer Modellsimulation des 3D-Spannungsfelds aus dem Deutschlandmodell von Ahlers et al. (2021) in das Reaktivierungspotenzial von tektonischen Störungen. Die Ergebnisse sind im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts SpannEnD – Spannungsmodellierung Endlagerung Deutschland (spannend-projekt.de; Förderkennzeichen 02E11637A) entstanden und werden aktuell zur Publikation vorbereitet.

Literatur

- Ahlers, S., Henk, A., Hergert, T., Reiter, K., Müller, B., Röckel, L., Heidbach, O., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., Anikiev, D. (2021). 3D crustal stress state of Germany according to a data-calibrated geomechanical model. *Solid Earth*, 12 (8), 1777–1799. <https://doi.org/10.5194/se-12-1777-2021>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018). Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands - Version 2016 - für DIN EN 1998-1/NA. *Bautechnik*, 95 (5), 371–384. <https://doi.org/10.1002/bate.201700098>
- Grünthal, G., Wahlstrom, R. (2012). The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *Journal of Seismology*, 16 (3), 535–570. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9302-y>
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M. O., Zoback, M.-L., Zoback, M. (2018). The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744, 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
- Hergert, T., Heidbach, O., Reiter, K., Giger, S. B., Marschall, P. (2015). Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, northern Switzerland. *Solid Earth*, 6 (2), 533–552. <https://doi.org/10.5194/se-6-533-2015>
- Kühn, M., Hennig, T., Heidbach, O., Scheck-Wenderoth, M. (2021). Modelle simulieren die Zukunft. *System Erde*, 11 (2), 30–35. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.5>
- Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K., Ziegler, M., Rajabi, M., Zimmermann, G., Müller, B., Tingay, M. (2020). An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions. *Geothermal Energy*, 8 (1). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00178-5>
- 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>
- Reiter, K., Heidbach, O., Reinecker, J., Müller, B., Röckel, T. (2015). Spannungskarte Deutschland 2015. *Erdöl Erdgas Kohle*, 131 (11), 437–442. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1361435
- Ziegler, M. O., Heidbach, O. (2020). The 3D stress state from geomechanical–numerical modelling and its uncertainties: a case study in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy*, 8 (1). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00162-z>