



The recent stress state of Germany – results of a geomechanical–numerical 3D model

Steffen Ahlers¹, Andreas Henk¹, Tobias Hergert¹, Karsten Reiter¹, Birgit Müller², Luisa Röckel²,
Oliver Heidbach^{3,4}, Sophia Morawietz^{3,4}, Magdalena Scheck-Wenderoth^{5,6}, and Denis Anikiev⁵

¹Engineering Geology, Institute of Applied Geosciences, TU Darmstadt, 64287 Darmstadt, Germany

²Technical Petrophysics, Institute of Applied Geosciences, KIT, 76131 Karlsruhe, Germany

³Seismic Hazard and Risk Dynamics, GFZ German Research Centre for Geosciences,
14473 Potsdam, Germany

⁴Institute for Applied Geosciences, TU Berlin, 10587 Berlin, Germany

⁵Basin Modelling, GFZ German Research Centre for Geosciences, 14473 Potsdam, Germany

⁶Department of Geology, Geochemistry of Petroleum and Coal, Faculty of Georesources and Material
Engineering, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Correspondence: Steffen Ahlers (ahlers@geo.tu-darmstadt.de)

Published: 10 November 2021

Abstract. A decisive criterion for the selection and the long-term safety of a deep geological repository for high radioactive waste is the crustal stress state and its future changes. The basis of any prognosis is the recent crustal stress state, but the state of knowledge in Germany is quite low in this respect. There are stress orientation data provided by the World Stress Map (WSM, Heidbach et al., 2018) and stress magnitude data from a database (Morawietz et al., 2020) for Germany, both providing selective information on the recent stress field. However, these data are often incomplete, of low quality and spatially unevenly distributed. Therefore, a 3D continuous description is not possible with these data so far, at most for the orientation of the maximum horizontal stress (S_{Hmax}), but not for the most important magnitudes of the minimum (S_{hmin}) and S_{Hmax} .

In the course of the SpannEnD project, a geomechanical–numerical 3D model of Germany is created, with which a continuous description of the complete tensor of the recent stress field in Germany is possible. The model covers an area of $1250 \times 1000 \text{ km}^2$ from Poland in the east, to France in the west, from Italy in the south to Scandinavia in the north. The depth extent is 100 km. Even though the focus is primarily on Germany, the model area was chosen to be so wide to minimize boundary effects and for a simplified definition of the displacement boundary conditions, which are ideally oriented perpendicular or parallel to the orientation of S_{Hmax} . The model contains a total of 21 units: The upper part of the lithospheric mantle, the lower crust, four laterally overlapping units of the upper crust, and 14 stratigraphic units of the sedimentary cover. The stratigraphic subdivision of the sedimentary cover is only done in the core area of the model; because this area is the focus of our study, our calibration data are mainly from this region and well-resolved geometry data are available. Outside of the core area, the sediments are grouped into an undifferentiated unit. The units are parameterized with density and elastic material parameters (Poisson's ratio and Young's modulus). The model has a lateral resolution of $2.5 \times 2.5 \text{ km}^2$ and a vertical resolution of a maximum of 240 m; in total it includes 11.1 million hexahedral elements. The equilibrium of forces between body and surface forces is solved by finite element method. The model is calibrated with S_{hmin} and S_{Hmax} magnitudes from the WSM and data from the stress magnitude database. First, an initial stress state is generated and in a second step displacement boundary conditions are defined at the model edges, which are adjusted until a best-fit to the calibration data is found. The results show good agreement with both the S_{Hmax} orientation data from the WSM and the magnitudes of the two principal horizontal stresses (S_{hmin} and S_{Hmax}) from the magnitude database.

Kurzfassung. Ein entscheidendes Kriterium für die Auswahl und die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle ist der krustale Spannungszustand und dessen zukünftige Veränderung.

gen. Grundlage jeder Prognose ist der aktuelle Spannungszustand, allerdings ist der diesbezügliche Kenntnisstand in Deutschland eher gering. Es gibt die Spannungsorientierungsdaten der „World Stress Map“ (WSM, Heidbach et al., 2018) und Spannungsmagnitudendaten aus einer Datenbank von Morawietz et al. (2020) für Deutschland, die beide selektive Informationen zum aktuellen Spannungsfeld liefern. Diese Daten sind jedoch oft unvollständig, von geringer Qualität und räumlich ungleich verteilt. Daher ist eine durchgängige 3-D-Beschreibung mit ihnen bisher allenfalls für die Ausrichtung der maximalen Horizontalspannung (S_{Hmax}), nicht aber für die wesentlich wichtigeren Magnituden der minimalen (S_{Hmin}) und S_{Hmax} möglich.

Im Rahmen des SpannEnD-Projekts (SpannEnD: Spannungsmodell Endlagerung Deutschland) wird ein geomechanisch-numerisches 3-D-Modell Deutschlands erstellt, mit dem eine kontinuierliche Beschreibung des vollständigen Tensors des aktuellen Spannungsfeldes in Deutschland möglich ist. Das Modell umfasst eine Fläche von $1250 \times 1000 \text{ km}^2$ von Polen im Osten bis Frankreich im Westen, von Italien im Süden bis nach Skandinavien im Norden. Die Tiefenerstreckung beträgt 100 km. Auch wenn der Fokus hauptsächlich auf Deutschland liegt, wurde das Modellgebiet zur Minimierung von Randeffekten und zur vereinfachten Definition der Verschiebungsrandbedingungen, die idealerweise senkrecht oder parallel zur Ausrichtung von S_{Hmax} angelegt sind, so weit gewählt. Das Modell beinhaltet insgesamt 21 Einheiten: den oberen Teil des lithosphärischen Mantels, die untere Kruste, 4 lateral überlappende Einheiten der oberen Kruste und 14 stratigrafische Einheiten der Sedimentbedeckung. Die stratigrafische Unterteilung der Sedimentdecke erfolgt nur im Kernbereich des Modells, da dieser im Fokus unserer Studie steht, unsere Kalibrierungsdaten hauptsächlich aus dieser Region stammen und gut aufgelöste Geometriedaten vorhanden sind. Außerhalb des Kernbereichs sind die Sedimente in einer undifferenzierten Einheit zusammengefasst. Die Einheiten werden mit einer Dichte und elastischen Materialparametern (Poissonzahl und E-Modul) parametrisiert. Das Modell hat eine laterale Auflösung von $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ und eine vertikale Auflösung von maximal 240 m. Insgesamt beinhaltet es 11,1 Mio. Hexaeder Elemente. Das Kräftegleichgewicht zwischen Volumen- und Oberflächenkräften wird über die Methode der finiten Elemente gelöst. Das Modell wird mit Magnituden von S_{Hmin} und S_{Hmax} aus der Spannungsmagnitudendatenbank kalibriert. Zunächst wird ein initialer Spannungszustand generiert, anschließend werden Verschiebungsrandbedingungen an den Modellrändern definiert, die solange angepasst werden, bis eine optimale Übereinstimmung mit den Kalibrierungsdaten erreicht ist. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung sowohl mit den S_{Hmax} -Orientierungen aus der WSM als auch mit den horizontalen Hauptspannungen (S_{Hmin} und S_{Hmax}) aus der Magnitudendatenbank.

Financial support. This research has been supported by the Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (grant no. 02E11637A).

Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K., Ziegler, M., Rajabi, M., Zimmermann, G., Müller, B., and Tingay, M.: An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions, *Geotherm. Energy*, 8, 25, <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00178-5>, 2020.

References

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., and Zoback, M.: 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>, 2018.