



# Uncertainties in geomechanical models – exhaustive vs. feasible approach

Moritz Ziegler<sup>1</sup> and Oliver Heidbach<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 14473 Potsdam, Germany

<sup>2</sup>Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Berlin, 10587 Berlin, Germany

**Correspondence:** Moritz Ziegler (moritz.ziegler@gfz-potsdam.de)

Published: 10 November 2021

**Abstract.** The stress state is a key component for the safety and stability of deep geological repositories for the storage of nuclear waste. For the stability assessment and prediction over the repository lifetime, the stress state is put in relation to the rock strength. This assessment requires knowledge of both the future stress changes and the current in situ stress state. Due to the limited number of in situ stress data records, 3D geomechanical models are used to obtain continuous stress field prediction. However, meaningful interpretation of the stress state model requires quantification of the associated uncertainties that result from the geological, stress and rock-property data. This would require thousands of simulations which in a high-resolution model is called an exhaustive approach. Here we present a feasible approach to reduce computation time significantly.

The exhaustive approach quantifies uncertainties that are due to variabilities in stress data records. Therefore, all available data records within a model volume are used individually in separate simulations. Due to the inherent variability in the available data, each simulation represents one of many possible stress states supported by data. A combination of these simulations allows estimation of an individual probability density function for each component of the stress tensor represented by an average value and a standard deviation. If weighting of the data records can be performed, the standard deviation can usually be reduced and the significance of the model result is improved. Alternatively, a range of different stress states supported by the data can be provided with the benefit that no outliers are disregarded, but this comes at the cost of a loss in precision. Both approaches are only feasible since the number of stress data records is limited. However, it is indicated that large uncertainties are also introduced by variabilities in rock properties due to natural intra-lithological lateral variations that are not represented in the geomechanical model or due to measurement errors. Quantification of these uncertainties would result in an exhaustive approach with a high number of simulations, and we use an alternative, feasible approach.

We use a generic model to quantify the stress state uncertainties from the model due to rock property variabilities. The main contributor is the Young's module, followed by the density and the Poisson ratio. They affect primarily the  $\sigma_{xx}$  and  $\sigma_{yy}$  components of the stress tensor, except for the density, which mainly affects the  $\sigma_{zz}$  component. Furthermore, a relative influence of the stress magnitudes, the tectonic stress regime and the absolute magnitude of rock properties is observed. We propose to use this information in a post-computation assignment of uncertainties to the individual components of the stress tensor. A range of lookup tables need to be generated that compile information on the effect of different variabilities in the rock properties on the components of the stress tensor in different tectonic settings. This allows feasible quantification of uncertainties in a geomechanical model and increases the significance of the model results significantly.

**Kurzfassung.** Der Spannungszustand ist eine Schlüsselkomponente für die Sicherheit und Stabilität einer geologischen Tiefenlagerung von radioaktivem Abfall. Um die Stabilität zu beurteilen und diese auch für die erwartete Dauer der Lagerung vorherzusagen, wird der Spannungszustand in Beziehung zur Gesteinsfestigkeit gesetzt. Für diese Beurteilung müssen sowohl der in Zukunft erwartete als auch der derzeit bestehende in-situ Spannungszustand bekannt sein. Da in Bezug auf den in-situ Spannungszustand nur wenige Daten vor-

liegen, kommen 3D-geomechanische Modelle zum Einsatz, um die zukünftigen Spannungsänderungen kontinuierlich vorhersagen zu können. Eine aussagekräftige Interpretation des Modells des Spannungszustands erfordert allerdings eine Quantifizierung der damit einhergehenden Ungewissheiten, die sich als Folge der geologischen Gegebenheiten, der Spannungsdatenpunkte und Gesteinseigenschaften ergeben. Eine umfassende Quantifizierung dieser Ungewissheiten erfordert Tausende Rechnungen, welches in einem hochauflösenden Modell nicht praktikabel ist. Hier stellen wir einen machbaren Ansatz vor, mit dem sicher der Zeitaufwand für die Modellierung auf einen realisierbaren Rahmen beschränken lässt.

Mit dem umfassenden Ansatz lassen sich Ungewissheiten quantifizieren, die sich aus den Variabilitäten in den aufgezeichneten Spannungsdaten ergeben. Daher werden alle verfügbaren Datensätze aus einem Volumenmodell individuell in separaten Szenarien genutzt. Wegen der natürlichen Variabilität der verfügbaren Daten repräsentiert jede Simulation einen von vielen möglichen Spannungszuständen, der sich aus den Daten ergibt. Eine Kombination dieser Simulationen ermöglicht es, eine individuelle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für jede Komponente des Spannungstensors zu modellieren, und zwar jeweils mit einem Durchschnittswert und einer Standardabweichung. Wenn sich die Eingangsdaten gewichten lassen, lässt sich die Standardabweichung meist reduzieren und die Signifikanz des Modellergebnisses verbessern. Alternativ lässt sich ein Bereich an Spannungszuständen angeben, welche auf den Daten basieren. Das ermöglicht es, keine Ausreißer zu übersehen, geht aber mit einer geringeren Genauigkeit einher. Beide Ansätze sind nur praktikabel, weil es nur begrenzt viele Spannungsmagnitudendaten gibt. Hinzu kommt jedoch eine große Quelle für Ungewissheiten durch unterschiedliche Gesteinseigenschaften, die sich aus den natürlichen lateralen Variationen im Gestein ergeben oder ein Resultat von Messfehlern sind. Um diese Ungewissheiten zu quantifizieren, wäre ein sehr umfangreicher Ansatz mit zahlreichen Simulationen erforderlich; wir hingegen möchten einen alternativen, praktikablen Ansatz nutzen.

Wir verwenden ein generisches Modell, um die Ungewissheiten des Spannungszustands zu quantifizieren, die sich aus den unterschiedlichen Gesteinseigenschaften ergeben. Am wichtigsten ist hierbei das Elastizitätsmodul, an zweiter Stelle die Dichte und die Poisson-Zahl. Diese beeinflussen vor allem die  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  Komponenten des Spannungstensors, mit Ausnahme der Dichte, die vor allem die  $\sigma_{zz}$ -Komponente beeinflusst. Außerdem lässt sich ein relativer Einfluss der Größenordnungen der Spannungen, des tektonischen Spannungsregimes und der absoluten Magnitude der Gesteinseigenschaften beobachten. Wir schlagen vor, anhand dieser Informationen im Anschluss an die Modellierung eine Zuordnung der Ungewissheiten zu den individuellen Komponenten des Spannungstensors vorzunehmen. Dafür werden zahlreiche Tabellen erstellt, welche die Effekte von verschiedenen Variabilitäten der Gesteinseigenschaften auf die Komponenten des Spannungstensors bei verschiedenen tektonischen Gegebenheiten umfassend darstellen. Das ermöglicht es, Ungewissheiten in einem geomechanischen Modell mit einem praktikablen Verfahren zu quantifizieren und die Aussagekraft der Ergebnisse des Modells deutlich zu verbessern.

**Financial support.** This research has been supported by the Bundesministerium für Bildung und Forschung (grant no. 02NUK053D), the Helmholtz Association (grant no. SO-093), and the GFZ German Research Centre for Geosciences.