

Numerische Simulationen zur Rückrechnung und Prognose von Setzungen und Gebirgsdeformation

B. Wöhrl¹, S. Bock¹, C. Schürmann¹

¹DMT GmbH & Co. KG, Am TÜV 1, 45307 Essen, Deutschland/Germany

E-Mail: B. Wöhrl - benedikt.woehrl@dm-group.com, S. Bock - sven.bock@dm-group.com,

C. Schürmann - christopher.schuermann@dm-group.com



Wöhrl



Bock

Einleitung

Zu Beginn jeder Ausbauplanung weisen die Informationen über die Bodenverhältnisse Lücken und Ungewissheiten auf. Die Unsicherheit wird weiter erhöht durch Vereinfachung einiger Annahmen, die notwendig sind, um komplexe Geologien und das mechanische Gebirgsverhalten in numerischen Modellen abzubilden.

Ein gängiger Ansatz für den Umgang mit potenziellen Risiken ist die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und Risikobewertung ausgewählter Parameter und schließlich Annahme der wahrscheinlichsten Boden- und Gebirgseigenschaften, die durch verschiedene Sicherheitsfaktoren angepasst werden. Dieser Ansatz führt in den meisten Fällen zu einem konservativen Ausbaudesign. Zwei Aspekte werden jedoch in der Regel nur unzureichend behandelt: Das Restrisiko und das Potenzial der Entwurfsoptimierung. Daher ist es wichtig, Werkzeuge zur Risikominimierung zu verwenden und eine angemessene Überwachung in jeden Planungsprozess einzubeziehen.

Im Folgenden werden anhand von Beispielprojekten die Nutzung von Laserscans untertägiger Grubenräume, oder des DMT SAFEGUARD Systems für numerische Simulationen gezeigt. Die kontinuierliche Sammlung neuer Daten ermöglicht ein idealisiertes numerisches Modell um weitere, wichtige Informationen (z.B. Ist-Zustand während Bauarbeiten) zu erweitern. Auf diese Weise wird die Zuverlässigkeit der Simulationen erhöht und die Auswirkungen der Bauarbeiten können besser abgeschätzt werden. Dies beinhaltet zum Beispiel die Identifikation von Risikobereichen an der Oberfläche, oder die Optimierung eines bestimmten Ausbauszenarios anhand von Überwachungsmessungen.

Untertägige Laserscans zur Modellerstellung

Untertägige Laserscans von Schächten, Füllörter und Strecken dienen zum einen als Basis bei der Erstellung numerischer Modelle, zum anderen, in Form von Wiederholungsmessungen, der Überwachung der Deformationen und Gebirgsbewegungen in untertägigen Bauwerken.

Wenn ein numerisches Modell von bestehenden Bauwerken erstellt werden soll, kommt es häufig vor, dass ursprüngliche Planungsunterlagen, aus denen die genauen Dimensionen des Bauwerks oder die Anordnung von Ausbaumitteln entnommen werden könnten, nicht vorliegen. Ebenso fehlen oft die geotechnischen Eigenschaften des im Planungsbereich anstehenden Gebirges.

Im ersten Beispielprojekt sollte der aktuelle Zustand des bestehenden, korrodierten Ausbaus eines Füllorts numerisch berechnet und darauf aufbauend Prognoseberechnungen der fortschreitenden Korrosion für bis zu 20 weitere Jahre Standzeit durchgeführt werden. Fehlende Planungsunterlagen und Gebirgseigenschaften machten den Einsatz eines Laserscans erforderlich, um aus den erfassten Daten ein CAD-Modell der Füllortgeometrie bzw. ein numerisches Modell für die Berechnungssoftware FLAC^{3D} [Itasca, 2023] zu erstellen. Aus der prozessierten und bereinigten Punktwolke des Laserscans konnte die Geometrie des Füllorts und die genauen Positionen der Ausbaumittel bestimmt werden. Die Punktwolke wurde dafür in die CAD Software Rhinoceros importiert und in horizontale und vertikale Schnitte unterteilt (Abbildung 1, a). Der Innenradius des Schachts, die Geometrie des Füllorts sowie die Positionen der TH-Profile konnten aus den Schnitten bestimmt und in das CAD-Modell übertragen werden (Abbildung 1, b).

Die stetige Weiterentwicklung von Mess- und Überwachungstechnik ermöglicht Setzungsprozesse und Gebirgsdeformationen mit zunehmender Genauigkeit in numerischen Modellen abzubilden. Mit Hilfe von Laserscans, durchgeführt sowohl vor als auch während der Bauarbeiten, können genauere numerische Modelle erstellt werden. Die baubegleitende Anpassung der Modellgeometrie ermöglicht zudem eine weitere Nachkalibrierung der Simulationen und erhöht damit die Zuverlässigkeit von Prognoseberechnungen. Die Simulationsergebnisse können fortlaufend mit den ursprünglichen Planungen abgeglichen und somit Ausbauplanungen angepasst und optimiert werden.

Numerical Simulations for back calculation and forecasting of ground subsidence and rock mass deformation

The ongoing development of monitoring and surveillance technology enables us to reproduce subsidence and rock mass deformation in numerical models with increasing precision. Laserscans prior to and during the construction work increase the spatial accuracy of numerical models. Adjustments of the model geometry during the construction work allow a recalibration of models and increase the reliability of forecast simulations. Simulation results can be successively compared to construction plans and allow adjustments and optimizations of support designs.

Schlagworte Keywords

Ausbauplanung
Support design

Numerische Modellierung
numerical modelling

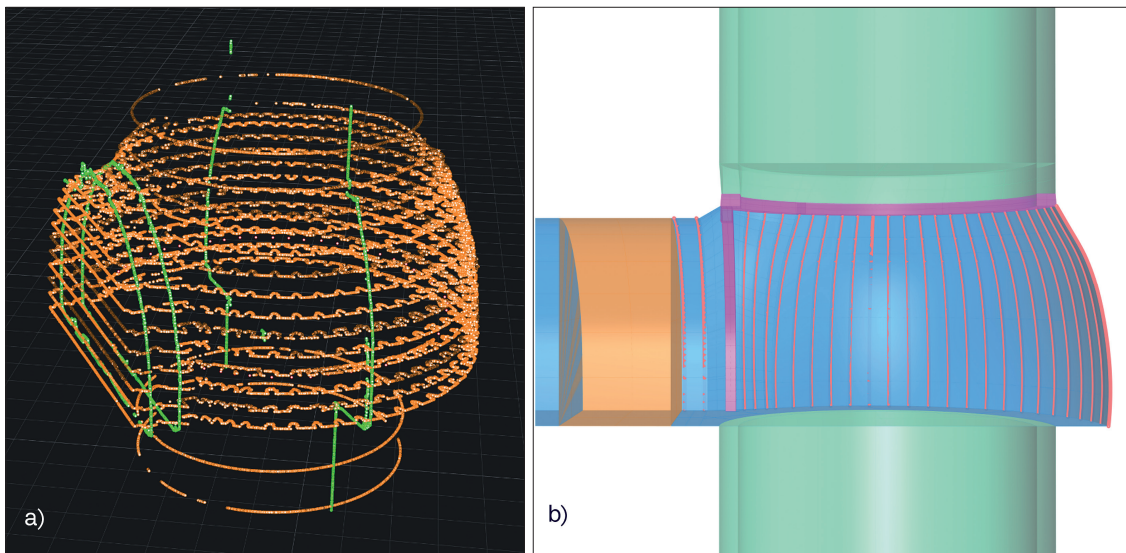
FLAC3D
FLAC3D

Echtzeitmessungen
real-time measurements

Laserscans
Laserscans

DMT SAFEGUARD
DMT SAFEGUARD

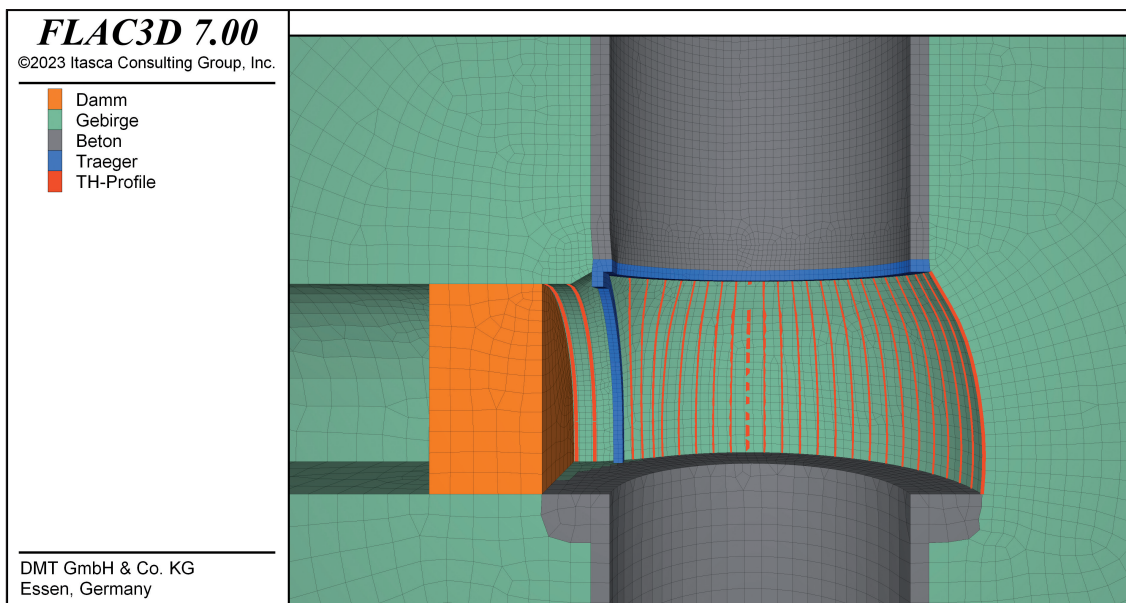
Abb. 1: Bereinigte Schnitte aus den Laserscan Daten (a) und das daraus erstellte CAD-Modell (b). Die Positionen der TH-Profile sind in (a) gut erkennbar.



Die Geometrien wurden daraufhin für die folgenden numerischen Simulationen mit der Software Griddle [Itasca, 2020] vernetzt. Das resultierende FLAC^{3D} Modell ist in Abbildung 2 dargestellt. Im weiteren Verlauf der

Arbeiten sollen aus sich regelmäßigen wiederholenden Laserscans Gebirgsbewegungen identifiziert und quantifiziert werden und als Grundlage für eine genauere Kalibration des numerischen Modells dienen.

Abb. 2: Das FLAC^{3D} Modell wurde mit Griddle vernetzt und entspricht der gescannten Geometrie.



Baubegleitende Laserscans zur Modellanpassung

In einem zweiten Beispiel soll gezeigt werden, wie Laserscans während des Schachtteufens genutzt werden können, um ein numerisches Modell baubegleitend an die tatsächliche Ausbruchskontur des Schachtes anzupassen [Weber et al., 2019]. Während des Schachtteufens auftretende Mehrausbrüche werden im Zuge der Sicherungsarbeiten mit Spritzbeton verfüllt, was die Ausbaudicke lokal erhöht.

Für die Messungen werden an der Ober- und Unterseite der Teufbühne Laserscanner montiert (Abbildung 2). Mit dem unteren Scanner wird während der Teufarbeiten die Ausbruchskontur des Gebirges gescannt, mit dem oberen Scanner der tatsächliche Innendurchmesser des Schacht nach einbringen des Spritzbeton Ausbaus. Das zu Beginn idealisierte numerische Modell

mit zylindrischem Spritzbetonausbau kann so baubegleitend an die realen Dimensionen angepasst werden (Abbildung 3).

Auf diese Weise wird die Zuverlässigkeit der Simulationen erhöht und die Auswirkungen der Bauarbeiten auf die Belastung des Ausbaus können besser abgeschätzt werden. Das Vorgehen erleichtert z.B. die Identifikation von Risikobereichen an der Oberfläche oder die Optimierung von Überwachungsmessungen für ein bestimmtes Ausbauszenario.

Integration des SAFEGUARD Systems

DMT SAFEGUARD [DMT, 2023] ist ein Datenmanagement- und Geoinformationssystem, das Monitoring-

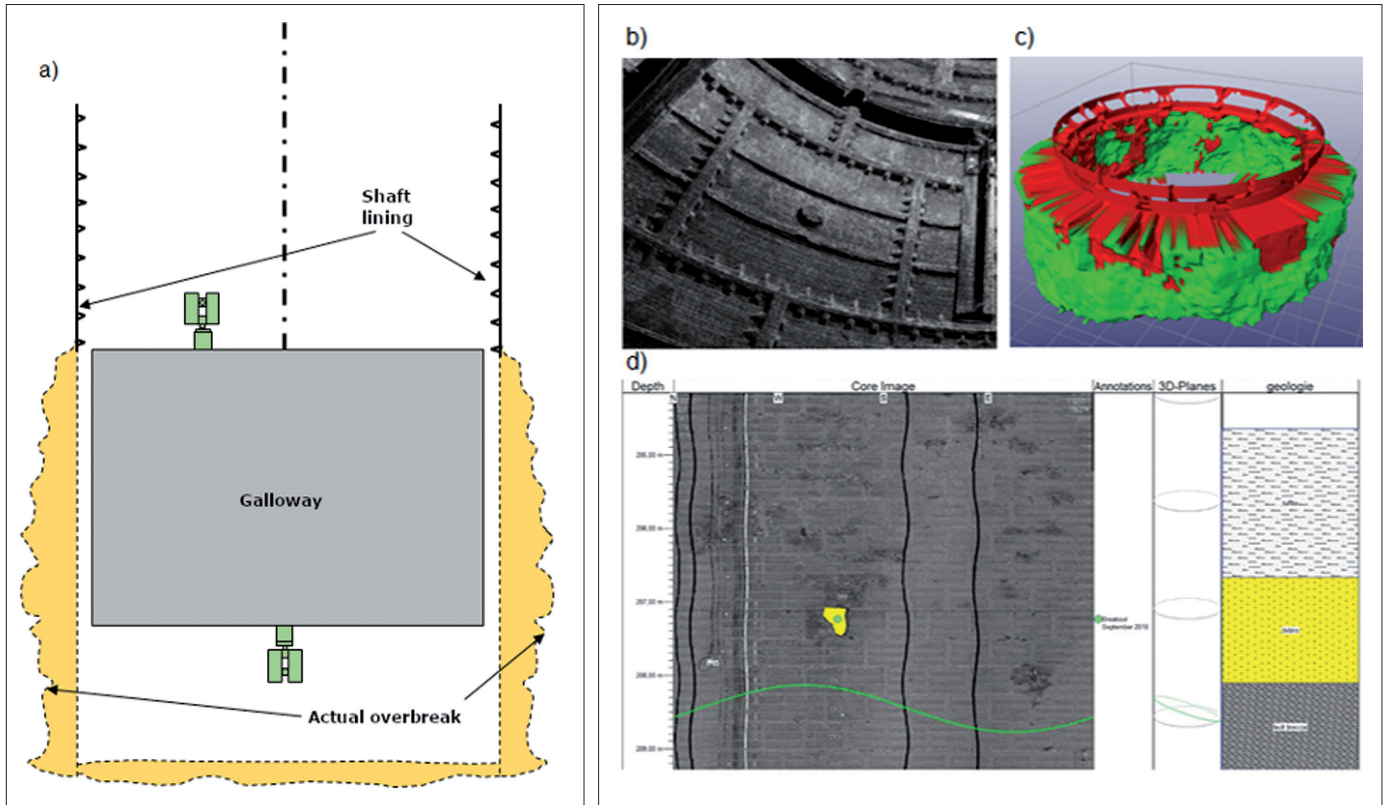


Abb. 3: Anordnung der Scanner an der Teufbühne (a), Ergebnisse der Laserscans (b & c). Zusätzlich wird die Geologie an automatisiert gescannte Bohrkerne angepasst (d) [Weber et al., 2019].

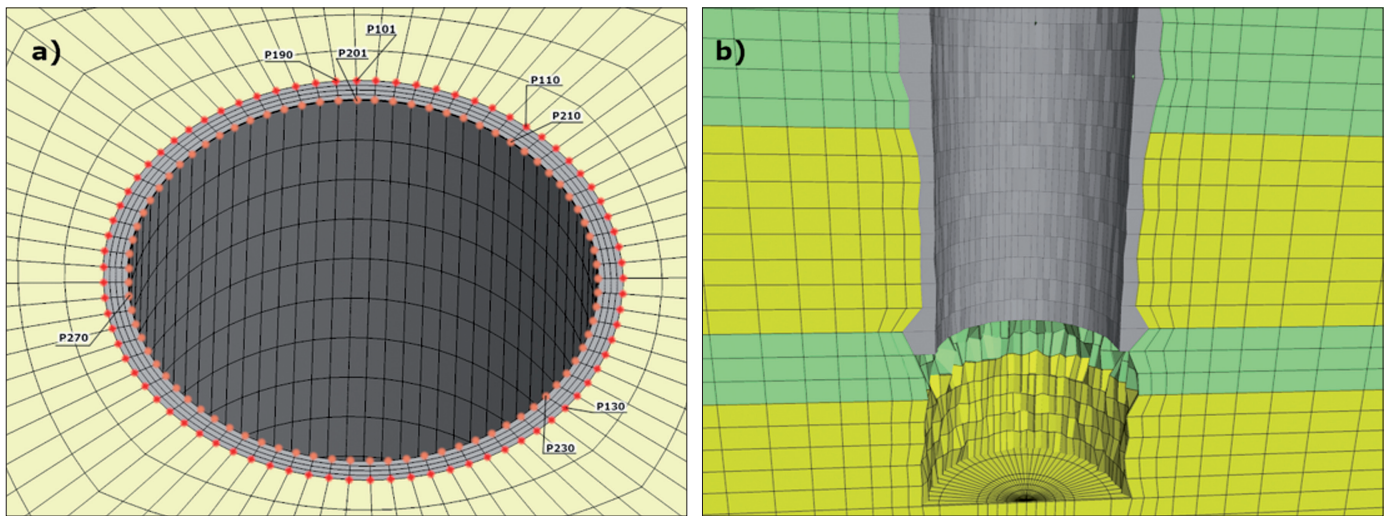


Abb. 4: Das anfangs idealisierte FLAC3D Schachtmodell (a) wird baubegleitend an die realen Dimensionen angepasst (b) [Weber et al., 2019].

daten erfasst, darstellt und analysiert und in welches viele unterschiedliche Sensorarten eingebunden werden können, z. B. Laserscanner, Inklinometer oder Extensometer. Bei Überschreitung definierter Messwerte gibt das System automatisiert Warnmeldungen aus.

Das folgende Beispiel eines Tunnelvortriebs durch ein Bergmassiv zeigt die Möglichkeit Messdaten aus dem DMT SAFEGUARD System in numerische Modelle zu integrieren [Schröder et al., 2020]. In dieser Studie wird zuerst ein idealisiertes numerisches Modell erstellt. Die Informationen über die Geologie weisen zu Beginn noch Lücken und Ungewissheiten auf (Abbildung 5, a). Während der Vortriebsarbeiten kann die Geologie kontinuierlich an die tatsächlich anstehenden Einhei-

ten im Bereich des Tunnels angepasst (Abbildung 5, b) und die Genauigkeit des Modells verbessert werden.

Ähnlich wie im vorherigen Fallbeispiel wird durch regelmäßige Laserscans während der Arbeiten zusätzlich die Ausbruchskontur und die Ausbaustärke an auftretende Mehrausbrüche angepasst (Abbildung 6). Die eingebauten Gebirgsanker werden ebenfalls in das numerische Modell übernommen. Somit kann die Simulation der Gebirgsdeformation, als auch der Auflockerungszone und des Spannungsfelds mit verbesserter Genauigkeit durchgeführt werden.

Das vorliegende Beispiel zeigt neben der Nutzung von Monitoringdaten auch eine weitere Anwendungsmöglichkeit von numerischen Simulationen: Im Vorfeld

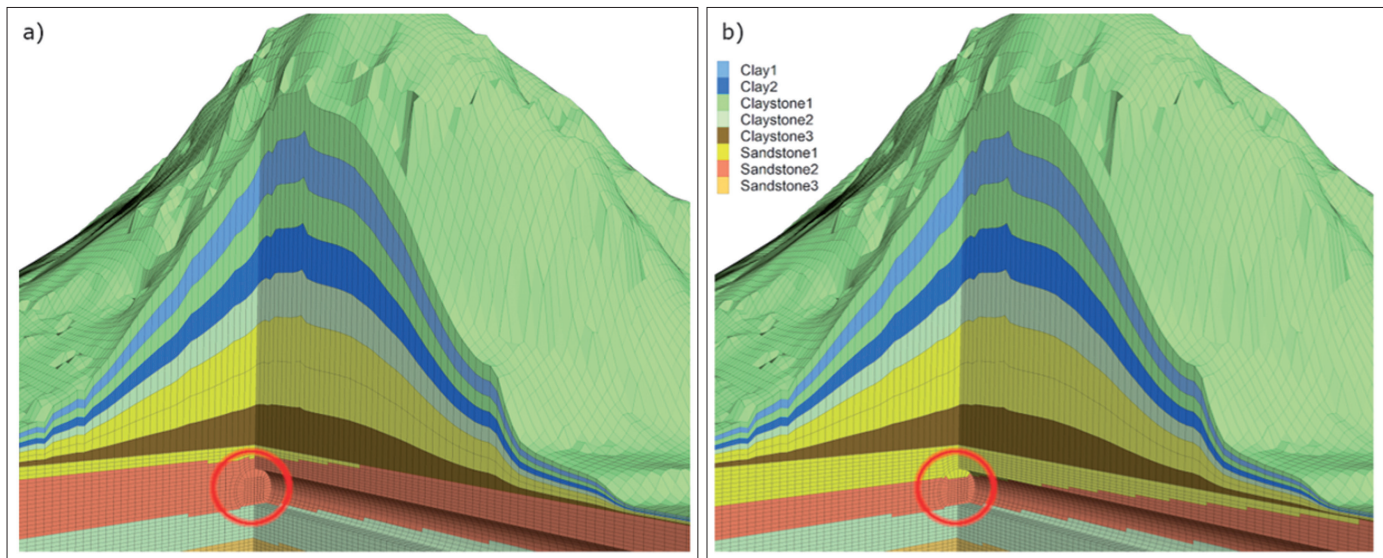


Abb. 5: Geologie des Gebirges zu Beginn der Berechnungen (a) und nach automatisierter Anpassung anhand von Loggingdaten (b) [Schröder et al., 2020].

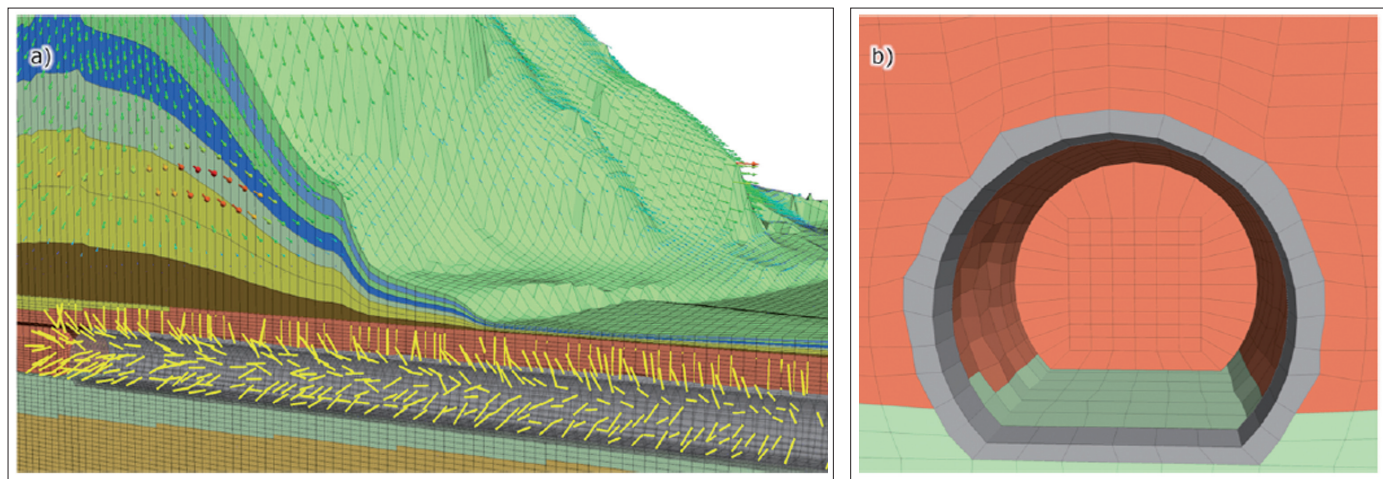


Abb. 6: Darstellung der Betonschale und Gebirgsanker im Modell (a). Die Ausbruchskontur und Betondicke werden während der Simulation angepasst (b) [Schröder et al., 2020].

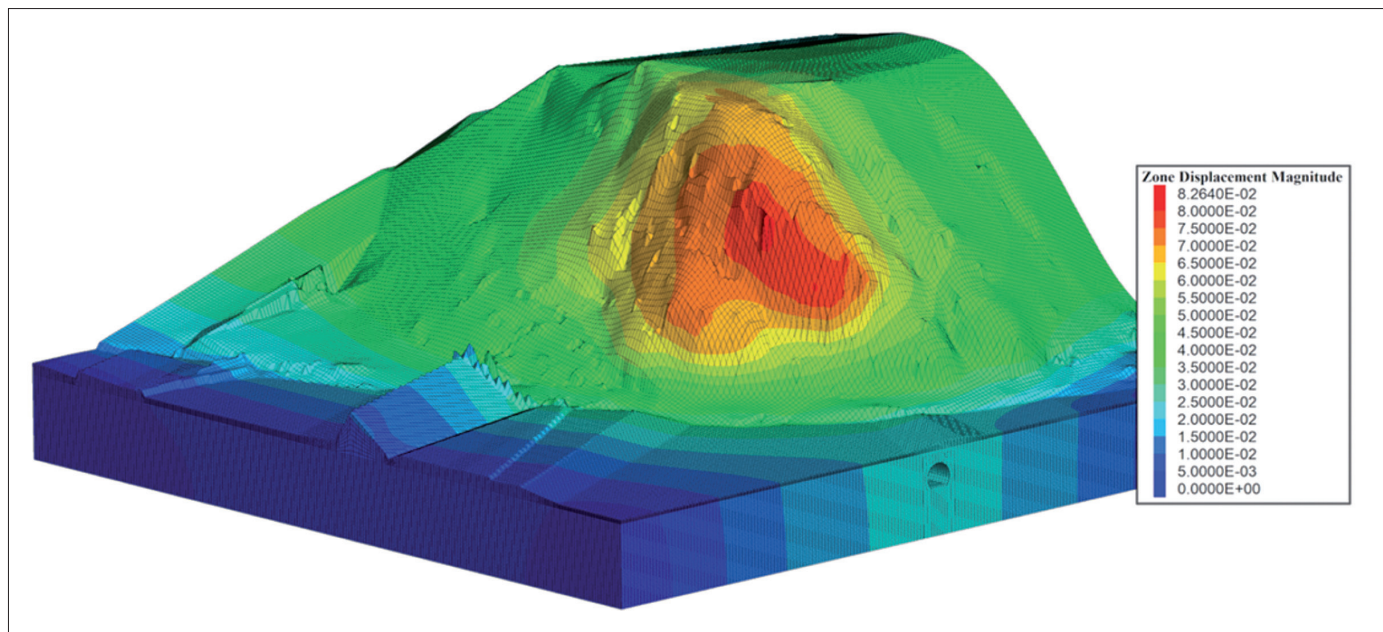


Abb. 7: Durch den Tunnelvortrieb verursachte Verschiebungen [m] an der Geländeoberkante [Schröder et al., 2020].

der Bauarbeiten können durch Prognoserechnungen potenzielle Gefahrenbereiche vorab identifiziert und dort gezielt die Messdichte zu erhöht werden. Bereiche mit erhöhten Setzungen und Deformationen an der Oberfläche (Abbildung 7) werden dadurch mit dem DMT SAFEGUARD System durch Laserscans oder Inclinometer zielgerichteter überwacht und bei Überschreiten der Warnwerte können zeitnah Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

Fazit und Ausblick

Die aktuelle Entwicklung konzentriert sich auf die Integration der Ergebnisse von Lasermessungen in numerische Modelle. Aufgrund der großen Menge an Daten, die aus Vermessungen gewonnen werden, ist es notwendig, den Prozess der Datenintegration zu automatisieren. Die aktuellen Ergebnisse zeigen eine Verbesserung der Zuverlässigkeit numerischer Modelle und stellen einen Schritt nach vorne in der Automatisierung der Gebirgsbeherrschung dar. Obwohl sowohl die erforderlichen Komponenten der Messhardware, als auch die geomechanische Software, bereits verfügbar sind, befindet sich eine automatisierte Integration der Daten noch in der Entwicklung. Letzteres wird auch eine vollständige Rückverfolgung der Datenerfassung und der Planungshistorie ermöglichen und damit die Projekttransparenz erheblich erhöhen.

Darüber hinaus erfordert die Modellerstellung aus Laserscans aktuell noch viele manuelle Arbeitsschritte und bietet somit noch Potential zur weiteren Automatisierung. Mögliche Ansatzpunkte sind hier die automatisierte Aufbereitung der Rohdaten, oder die automatisierte Triangulation der gescannten Geometrien in CAD-Programmen.

Literaturverzeichnis

1. DMT GmbH & Co. KG (2023). DMT SAFEGUARD – IoT Monitoring Platform, URL: <https://safeguard.dmt.de/> (Abrufdatum: 13. September 2023)
2. Itasca Consulting Group, Inc. (2023) FLAC3D — Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions, Ver. 9.0. Minneapolis: Itasca.
3. Itasca Consulting Group, Inc. (2020) Griddle, Ver. 2.0. Minneapolis: Itasca.
4. Schröder, D, Zimmermann, K, Bock, S & Klonowski, J (2020). 'i²MON: development of an integrated monitoring system for the detection of ground and surface displacements caused by coal mining', in PM Dight (ed.), Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 353-366, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2025_19
5. Weber, M, Garcia Pina, C, Bock, S, Franz, J and Henriquez, J, (2019). Automation of ground control for mine shaft sinking a step forward, in Proceedings Future Mining 2019, pp 6870 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne)