

Strukturuntersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit und Standsicherheit mittels TLS am Beispiel des geplanten Pumpspeicherwerks Blautal

Structural analysis for permeability and stability assessment by use of TLS for the pumped storage hydropower plant Blautal

Achim Köhler¹, Sibylle Hennings², Hieu T. Nguyen³, Tomás M. Fernández-Steeger⁴

¹ Dr. rer. nat. Achim Köhler, Dr. Köhler & Dr. Pommerening GmbH, Harsum, achim.koehler@koehler-pommerening.de

² Geowiss. M.A., Sibylle Hennings, Dr. Köhler & Dr. Pommerening GmbH, Harsum, sibylle.hennings@koehler-pommerening.de

³ Dipl.-Geol. Hieu Trung Nguyen, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, nguyen@lih.rwth-aachen.de

⁴ Dr. rer. nat. Tomás M. Fernández-Steeger, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, fernandez-steeger@lih.rwth-aachen.de

Zusammenfassung

Derzeit wird das Pumpspeicherkraftwerk Blautal ca. 4 km östlich des Blautopfes mit einem nicht abgedichteten Unterbecken unterhalb des Grundwasserspiegels in einem Kalksteinbruch am Südrand des Blautals geplant. Das Unterbecken wird im Osten von einer 95 m hohen, steil geböschten Felswand begrenzt. Aufgrund der hohen Umfeldsensibilitäten werden minimale Auswirkungen der Becken- und Grundwasserspiegelschwankungen auf die Umgebung gefordert. Um dies sicher zu stellen sind die Erstellung eines detaillierten geohydraulischen Gebirgskörpermodells sowie eine detaillierte geotechnische Untersuchung der Großböschung notwendig. Deshalb ist der gesamte Steinbruch mit Terrestrischem Laserscanning (TLS) aufgenommen und ein hochaufgelöstes Geländemodell (HRDEM) des Standortes erstellt worden. Dadurch ist es möglich das Trennflächengefüges unter geotechnischen und geo-hydraulischen Gesichtspunkten in einem wesentlich höheren Detailgrad zu erfassen. Wesentliche Vorteile des Verfahrens sind der hohe Detailgrad, die erhebliche Verbesserung der Dokumentation und die Synergieeffekte durch die Mehrfachverwendung der Daten zur Beantwortung planerischer, geohydraulischer sowie geotechnischer Fragestellungen.

Schlüsselworte: Pumpspeicherwerk, Blautal, TLS, Felskartierung, Geohydraulik, Geotechnik

Abstract

At present the pumped-storage hydropower plant Blautal is planned with a unsealed lower basin below the groundwater table in a limestone quarry at the southern margin of the Blautal, about 4 Km east of the karst spring Blautopf. The lower basin will be bordered in the east by a steep 95 m high rock face. Due to the high environmental sensibility minimal impact of basin and groundwater level fluctuations to the vicinity is required. To ensure this a detailed geohydraulic and geotechnical rock mass description is essential for modeling. Therefore, terrestrial laser scanning (TLS) was used to map the quarry and subsequently a high resolution digital elevation model (HRDEM) was established. This allows to perform spatial joint analysis with respect to the distribution of geohydraulic and geotechnical properties of the rock mass in the quarry. The results show a high quality and allow a distributed joint analysis and identification as well as projection of major joints in the quarry. Results from joint density mapping can be projected on the rock face and validated by visual inspection. Furthermore a transparent aggregation of units to homogeneous units for modeling can easily performed. The major advantages of this procedure is a much high level of detail, a substantial improvement of documentation and synergetic effects due to multiple usage of data for planning, geohydraulic and geotechnical questions. Operational experiences prove that primer higher efforts for data collection and processing will be compensated by far due to multi-use of data and flexibility in data supply in terms of quantity and quality.

Keywords: Pumped-storage hydropower plant, Blautal, TLS, Joint mapping, Geohydraulics, Geotechnics

1 Einleitung

Für die Planfeststellung des Pumpspeicherwerks PSW Blautal (Abb. 1) ca. 4 km östlich des Blautopfes bei Blaubeuern werden derzeit im Auftrag der STADTWERKE ULM (SWU) und der FA. MERKLE GMBH & CO KG am Südrand des Blautals umfangreiche geohydraulische und geotechnische Standortuntersuchungen durchgeführt. Das PSW soll bei einem bewirtschafteten Wasservolumen von 1,1 Mio m³

und bei einer Fallhöhe von ca. 170 m eine Leistung von 60 MW besitzen. Erstmals in der Bundesrepublik sieht die zur Genehmigung stehende Planung als Vorzugsvariante vor, das Unterbecken (Abb. 2) in einem Kalksteinbruch ohne Sohl- und Wandabdichtung im Grundwasser zu errichten. Zur Schaffung des Beckenvolumens soll der bestehende Kalksteinbruch mit seinen hochqualitativen Rohstoffen („Ulmer Weiß“) bis ca. 10 m unterhalb des Grundwasserspiegels eingetieft werden. Hierzu sind



während der Abbauzeit entsprechende Wasserhaltungsmaßnahmen zur Trockenhaltung des Abbaufeldes erforderlich. Das Unterbecken wird nach seiner Fertigstellung im Osten von einer 95 m hohen, steil geböschten Felswand begrenzt (Abb. 3).

Die vor dem Hintergrund der hohen Umfeldsensibilitäten im Raumordnungsbeschluss geforderten minimalen Auswirkungen der Becken- und Grundwasserspiegelschwankungen während der (Ab-)Bauzeit und während des Speicherbetriebes auf die Umgebung sowie die zu erwartenden dynamischen Spannungsveränderungen innerhalb des Gebirges erfordern die Erstellung eines detaillierten geohydraulischen Gebirgskörpermodells mit abgesicherten Aussagen zur Ausbildung des Trennflächengefüges und zur räumlichen Lage vorhandener Karst- und Fließstrukturen.



Abb. 1: Luftbild des geplanten Standortes des Pumpspeicher-werks (PSW) Blautal mit Montage des Ober- und Unterbeckens.

Fig. 1: Aerial view of the proposed site of the pumped-storage hydropower plant (PSH) Blautal showing the proposed upper and lower basin location.

Neben detaillierten Bohrkernaufnahmen sowie umfangreichen geohydraulischen und geophysikalischen Bohrlochversuchen sind für die Genehmigungsplanungen eine Felskartierung und Trennflächenanalyse notwendig, die die räumlich inhomogenen und anisotropen jurassischen Riffe (s. Hintergrund und Kalksteinserien) innerhalb des Steinbruchs und seines relevanten Umfeldes charakterisiert. Hierzu ist der gesamte Steinbruch inklusive des geplanten Standortes des Unterbeckens mit einem terrestrischen Laserscanner (Terrestrial Laser Scanning, TLS) aufgenommen worden. Zusätzlich wurden für die Felskartierung vor allem an der Ostböschung Detailscans, aufgenommen, um ein hoch aufgelöstes Geländemodell (HRDEM) relevanter Gebirgsbereiche zu erstellen. Zusammen mit einer hochaufgelösten Fotokartierung bilden die Scan- und Fotoaufnahmen die Datengrundlage für eine semiautomatische Kartierung von Trennflächen und Wasserwegsamkeiten. Ziel ist die Erfassung des Trennflächengefüges über den gesamten Steinbruch unter sowohl geohydraulischen als auch geotechnischen Gesichtspunkten in einem wesentlich höheren Detailliertheitsgrad als dies bisher durch manuelle Kartierungen möglich ist. Unter diesen Zielstellungen sollen aus der durch Laserscanning ermittelten Punktwolke Trenn-

flächenorientierungen, Klüftigkeit sowie Großklüfte im Modell herausgegriffen und in ihrer Verteilung und räumlichen Erstreckung reproduzierbar dargestellt und für die weiteren Modellierungen verfügbar gemacht werden. Darüber hinaus eröffnet das Verfahren durch seine hoch aufgelöste Datenabdeckung eine umfassende Dokumentation sowie weitreichende Synergieeffekte durch die Mehrfachverwendung von Daten zur Beantwortung sowohl geohydraulischer als auch geotechnischer Fragestellungen. Im Endergebnis sollen die Auswertungen der Laserscans als Grundlage für ein dreidimensionales numerisches Grundwasserströmungsmodell zur Durchführung von Prognose-rechnungen sowie für numerische Modelle zur Standsicherheitsbewertung der Ostböschung dienen.

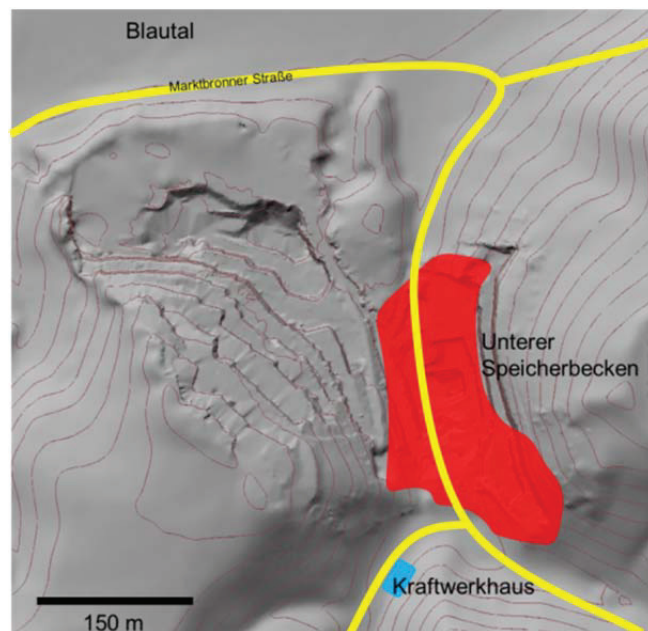


Abb. 2: Geländemodell des Steinbruchs mit geplantem Unterbeckenstandort des Pumpspeichers Blautal.

Fig. 2: DEM of the quarry and planned lower basin location of the pumped storage Blautal.

2 Vorgehensweise

Die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften eines Gebirgskörpers werden primär durch sein Trennflächengefüge bestimmt, dessen Erfassung im Normalfall durch eine manuelle Kartierung mit anschließender Charakterisierung der räumlichen Verteilung geometrischer, mechanischer und hydraulischer Eigenschaften erfolgt. Darüber hinaus sind für eine Bewertung der Wasserwegsamkeiten in einem geklüfteten Gebirgskörper der Grad der Zerklüftung (Trennflächenabstände), die räumliche Erstreckung der Trennflächen, Kluftöffnungsweiten, der Verwitterungs- und Verkarstungsgrad sowie die Art der Kluftfüllungen von besonderer Relevanz. Je nach Ausprägung nehmen diese Faktoren auch Einfluss auf das geomechanische Verhalten eines Gebirgskörpers.

Trotz systematisierter Erfassungs- und Bewertungsschemata (HEITFELD et al. 1980, KÖHLER 1990, PRIEST 1993) sind manuelle Kartierungen im Einzelfall nicht nur schwer durchführbar, sondern können auch nicht zu vernachläss-

sigende Bewertungsfehler z.B. durch Geländeunzugänglichkeiten oder durch den subjektiven Eindruck bzw. die subjektive Ansprache der kartierenden Personen beinhalten. Im vorliegenden Betrachtungsraum liegen z. B. außerordentlich komplexe Verhältnisse hinsichtlich einer Bewertung des Trennflächengefüges vor. Durch sedimentäre Prozesse und dadurch bedingte Wechsel zwischen einem geschichteten Aufbau und massigen Riffkomplexen kommt es lokal zu stark variierenden Schichtmächtigkeiten und in ihrer Raumlage komplexen Trennflächenstrukturen, die durch ihre Entstehung oftmals unregelmäßig, bogenförmig ausgebildet und somit linear unbeständig sind (oberer Bildbereich Abb. 3).

Zudem sind in betriebenen Steinbrüchen die Wandbereiche außer in ihrem Endzustand durch die Sprengaktivitäten stark aufgelockert und das originäre Trennflächengefüge entsprechend verändert bzw. nur schwer zu bewerten. Eine traditionelle Bestimmung mit einem Gefügekompass gestaltet sich auch aus diesen Gründen als sehr schwierig. Im Allgemeinen sind daher manuelle Erfassungen sehr arbeits- und zeitaufwendig und häufig wirtschaftlich nicht vertretbar. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein hoher Detaillierungsgrad erforderlich ist und diese als Datengrundlage für weitere numerische Modellierungen dienen sollen.



Abb. 3: IIRIS-Optech 3D-Scanner bei der Aufnahme der Ostwand des Pumpspeichers Blautal.

Fig. 3: IIRIS-Optech 3D-Scanner scanning the east slope of the pumped storage Blautal.

Als Alternative zu einer manuellen Kartierung stehen Messungen mit der LiDAR-Technologie (Light Detection and Ranging) zur schnellen Vermessung der Geländeoberfläche als detaillierte Punktdaten zur Verfügung. Ein terrestrisch gestützter Laserscanner sendet einen Laserimpuls aus und detektiert das von einer Zieloberfläche reflektierte Signal. Aus der Zeitdifferenz zwischen Aussendungen und Empfang der reflektierten Laserimpulse wird die Distanz zwischen Scanner und der Zieloberfläche gemessen. Bei bekannter Position können jeder Laserreflexionspunkt georeferenziert sowie dessen 3D-Koordinaten mit einer Genauigkeit im mm- bis cm-Bereich bestimmt werden. Aus der georeferenzierten Punktwolke können im Anschluss detaillierte digitale Geländemodelle (DGM) erstellt werden, die zusammen mit Fotografien als Grundlage für die Felskartierung herangezogen werden können.

Im bestehenden Steinbruch am Unterbeckenstandort wurde in einer Studie die Ostböschung sowie gegenüberliegende Steinbruchwände mit Hilfe des terrestrischen Laserscanners IIRIS 3D der Fa. OPTECH mit einem Punktabstand von 2 cm aufgenommen (Abb. 4). Nach dem von NGUYEN et al. (2011) beschriebenen Workflow wurde im Rahmen der Datenaufbereitung und Verarbeitung aus den Scandaten ein georeferenziertes digitales Geländemodell (DGM) des Steinbruchs und aus den Detailscans ein HRDEM der Ostböschung erstellt und mit digitalen Fotoaufnahmen referenziert (Abb. 2).

3 Felskartierung

Für einen effizienten, lösungsorientierten Ansatz wird das HRDEM zum einen für Analysen der geometrischen Strukturdaten in mehrere kleinere Flächenabschnitte gegliedert, zum anderen für eine orthogonal projizierte Karte zur maßstäblichen Kartierung der Trennflächen verwendet.

Anschließend wird abschnittsweise eine semi-automatische Trennflächenanalyse zur Bestimmung der Raumlage und zur Identifikation der Anzahl von Trennflächenscharen unter Verwendung von Software wie z.B. Split FX oder COLTOP-3D durchgeführt. Derzeit werden auch weitere Ansätze mit selbst entwickelten MATLAB-Programmen getestet. Für die flächenbezogenen Analysen wurden durch die Transformation des HRDEM in ein strukturiertes Polygonnetz die Einfallsrichtung und -winkel berechnet.

Durch die Darstellung des Gefügedaten im Polpunktdiagramm und durch Einfärbung von Trennflächenclustern können unterschiedliche, räumliche Orientierungen visualisiert werden. Zur Identifikation der Häufigkeit vorhandener Trennflächenrichtungen werden aus der Dichteverteilung der Polpunkte sukzessive dominierende Trennflächenscharen eliminiert, um untergeordnete Trennflächenrichtungen zu identifizieren (Abb. 4).

Aufgrund der N-S streichenden und steil nach W einfallenden Böschungswand dominieren auch im automatisch ermittelten Gefügedatensatz zunächst mittel bis steil nach W einfallende Trennflächen den Stereoplot (Abb. 4-1). Nach der selektiven Löschung dieses Trennflächensystems aus dem Datensatz wird aus Abb. 4 ersichtlich, dass in dem untersuchten Böschungsabschnitt zwei Kluftscharen (Abb. 4-2) existieren, die zueinander spitzwinklig ausgerichtet sind. Dabei dominieren die NNW-SSE streichenden gegenüber den WSW-ENE streichenden Klüften. Andere Richtungen sind deutlich schwächer vertreten. Durch weitere sukzessive Dezimierungen können weniger dominante WNW-ESE streichende Kluftscharen (Abb. 4-3) herausgearbeitet werden. Die Kluftscharen stehen überwiegend steil (70° bis 90°). Die verbliebenen Trennflächen (Abb. 4-4) lassen nach einer farblichen 3D-Visualisierung (Abb. 5) eine NE-SW streichende Störungsfläche zuordnen. Gebunden an lokalen Riffkörperereinschlüssen weisen die in den Scandaten unterrepräsentierten, generell nach Osten flach einfallenden Schichten stark nach N streuende Einfallsrichtungen auf.

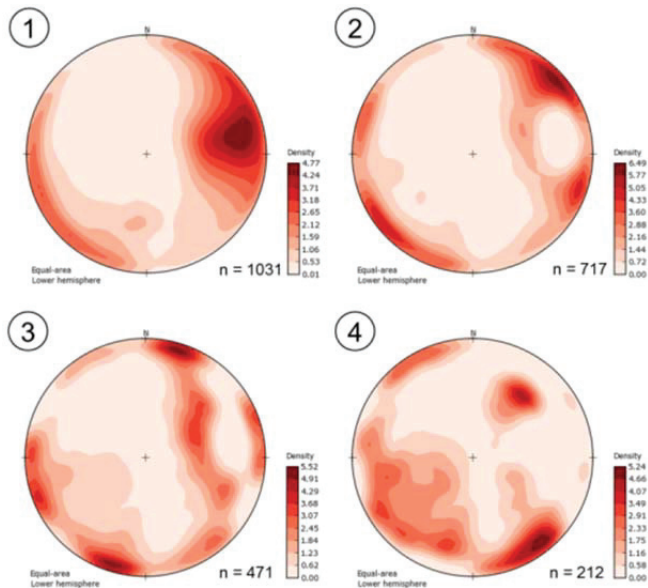


Abb. 4: Bestimmung von Trennflächenscharen durch sukzessive gerichtete Datenreduktion.

Fig. 4: Identification of different joint sets by applying a directed successive data reduction.

Im Anschluss an die Polpunktauswertungen wird eine kleinmaßstäbliche Kartierung der Trennflächen auf das orthogonal projizierte HRDEM und georeferenzierten Fotos

vorgenommen. Angefangen mit einer digitalen Kartierung des Trennflächengefüges stellen Klein- bis Mittelklüfte den überwiegenden Teil des Kluffinventars dar. Sie bilden ein Kluffmuster, das mit den dominierenden Kluffscharen (Abb. 4-2) korreliert. Übergeordnet streichen Großklüfte in WSW-ENE Richtung und entsprechen der quantitativ seltener vorhandenen Kluffschar (Abb. 4-3).

Für die Ermittlung des Zerklüftungsgrades (Kluffabstände) werden parallel zur Wandexposition horizontale Messgeraden in 1 m Abständen über die gesamten Wandhöhen angelegt. Bedingt durch die hohe Scan- und Fotoauflösung kann digital für jede Messgerade manuell die Kluffdichte bestimmt und deren Veränderung zur Tiefe hin beurteilt werden. Infolge der regelmäßigen, flächendeckenden Anlage von Klüftigkeitsziffern entstand ein Messraster, welches als Datengrundlage für die Einteilung von Homogenbereichen dient (Abb. 6). Alternativ werden zur Zeit Algorithmen zur „Corner Detection“ in MATLAB getestet, um Kluffausbisse auf der Felswand zu identifizieren. Diese sind jedoch bisher noch nicht großmaßstäblich ausreichend überprüft.

Die Bestimmung der weiteren, vor allem für eine geohydraulische Bewertung relevanten Parameter, wie Klufföffnungsweiten, Verwitterungs- und Verkarstungsgrad etc. (s.o.) kann dann im Anschluss ohne großen Zeitaufwand auf Basis der aus den Untersuchungen erstellten Kartengrundlagen im Gelände erfolgen.

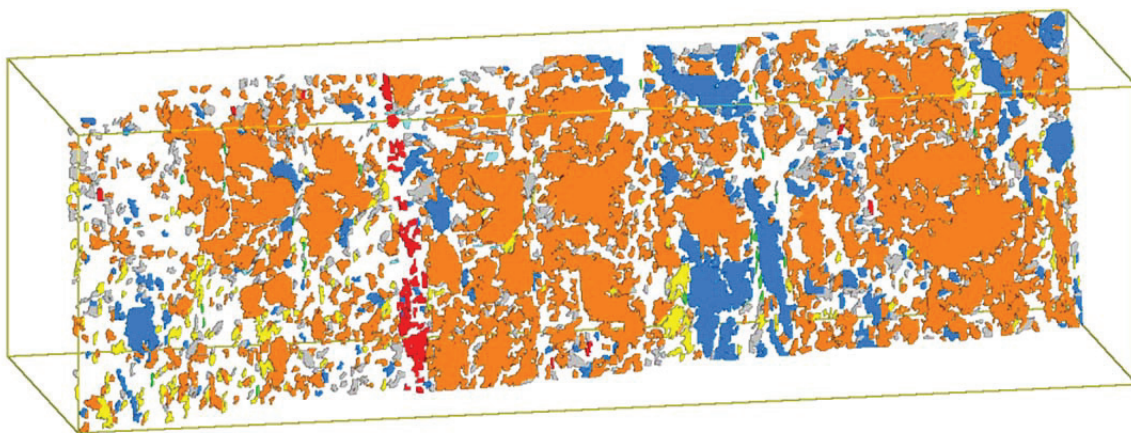


Abb. 5: Visualisierung unterschiedlicher Trennflächenscharen zur Validierung und kontextuellen Zuordnung.

Fig. 5: Visualisation of different joint sets for validation and analysis.

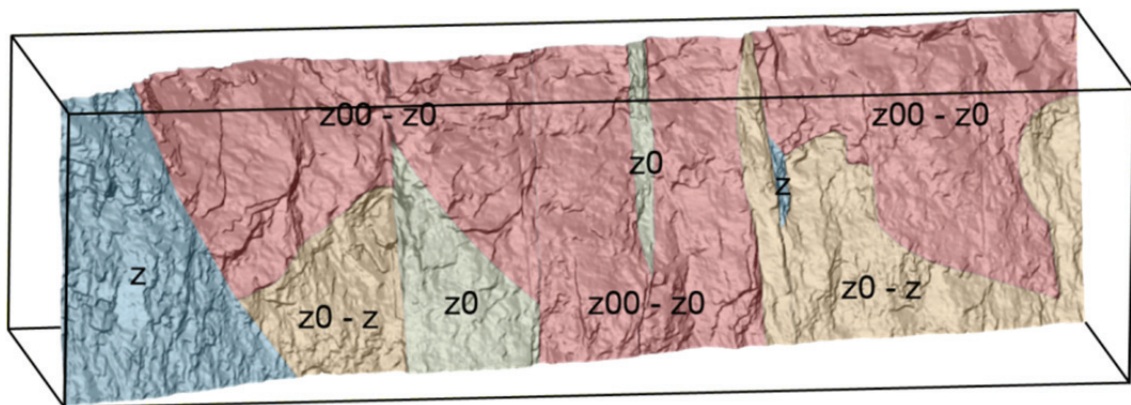


Abb. 6: Felskartierung mit Homogenbereichen auf Basis der Kluffdichte nach Heitfeld et al. (1980).

Fig. 6: Rock mapping of the test area displaying the joint density after HEITFELD et al. (1980).

Unter Hinzuziehung der Kartierung, Fotodaten und dem Schattenrelief kann im projizierten DGM in einem weiteren Arbeitsschritt die räumliche Erstreckung hydraulisch relevanter Großklüfte herausgearbeitet werden. Abb. 7 zeigt die Ergebnisse beispielhaft an ausgewählten Großklüften.

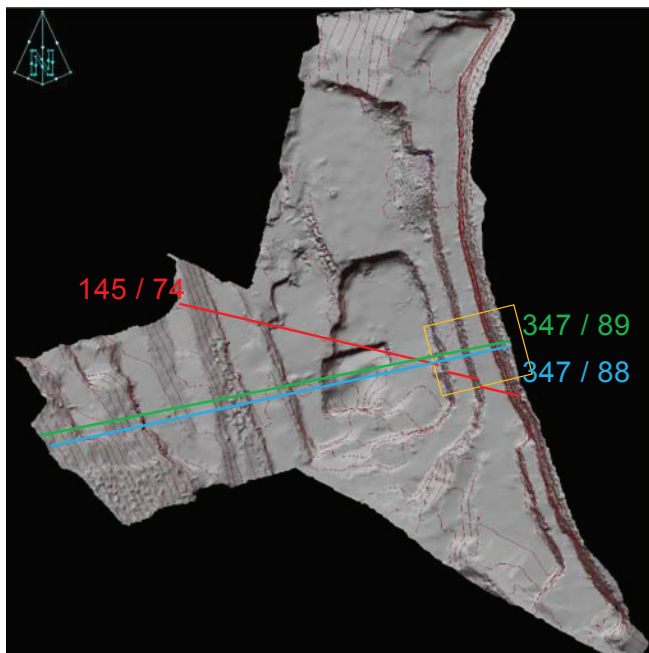


Abb. 7: Raumlagen hydraulisch relevanter Großklüfte am Unterbeckenstandort, PSW Blautal.

Fig. 7: Aquiferous clefts at lower basin site, PSW Blautal.

4 Numerisches Grundwasserströmungsmodell

Anhand der gefügekundlichen Auswertungen sowie anhand der aus der Kartierung ermittelten Daten zum Trennflächengefüge sowie den Wasserwegsamkeiten wird derzeit ein numerisches Grundwasserströmungsmodell unter Verwendung der Software FEFLOW für den Unterbeckenstandort und den potentiellen Beeinflussungsraum diskretisiert. Neben den beschriebenen Daten stehen für eine Modelldiskretisierung weitere umfangreiche Daten aus ca. 40 Kernbohrungen mit Kamerabefahrungen und Trennflächenvermessung sowie geophysikalischen und hydraulischen Bohrlochversuchen zur Verfügung. Diese Daten, insbesondere zu den Wasserwegsamkeiten und zu den aus den Bohrlochversuchen gewonnenen Gebirgsdurchlässigkeiten, wurden ebenfalls im DGM gepflegt. Darüber hinaus stehen umfangreiche Datensätze zur Gebirgsdurchlässigkeit und zu bevorzugten Grundwasserfließrichtungen aus mehreren großmaßstäblichen Pumpversuchen zur Verfügung. Erste Ergebnisse aus der Modelliteration erlauben bereits zum jetzigen Zeitpunkt die Aussage, dass anhand der beschriebenen Vorgehensweise zur Ermittlung des Trennflächengefüges und der Wasserwegsamkeiten des Gebirgskörpers eine für zuverlässige Aussagen und Prognoserechnungen ausreichende Datenbasis geschaffen werden kann, die insbesondere auch für numerische Modelle unter sehr komplexen Standortverhältnissen herangezogen werden kann.

5 Geotechnische Bewertung der Ostböschung

Ein wesentlicher Vorteil der beschriebenen Vorgehensweise und ihre sukzessive Auswertung für geohydraulische Untersuchungen sind die Synergieeffekte für die geomechanische Beurteilung des Speicherbereichs und der daran angrenzenden Ostböschung.

Basierend auf den geometrischen Daten und den Trennflächenanalysen kann zunächst über den gesamten Böschungsbereich eine Prüfung potentieller Versagensmechanismen entlang von Trennflächen unter Berücksichtigung der lokalen Böschungsorientierung und lokaler Trennflächengefüge erfolgen. In Fällen, in denen ein Gleiten potentiell möglich ist, können entweder relevante Trennflächen im HRDEM markiert oder ein statistisches Trennflächenmuster räumlich in die Böschung projiziert werden, um die Größe von potentiellen Gleitkeilen zu ermitteln. In Kombination mit den geometrischen Daten können im Schnitt die Größe von potentiellen Gleitkeilen bestimmt und für Standsicherheitsrechnungen übernommen werden.

Für die geotechnische Betrachtung ist darüber hinaus die ermittelte räumliche Trennflächendichte (Abb. 6), Trennflächenerstreckung (Abb. 7) und Verwitterungszustand von Bedeutung. In Vorbereitung für numerische Standsicherheitsuntersuchungen bilden sie die Grundlagendaten, um geotechnische Homogenbereiche abzugrenzen und deren Inventar zu definieren. Aufgrund der hohen Dichte an Informationen aus der aufgeschlossenen Ostböschung können zudem wichtige Informationen zur räumlichen Heterogenität erschlossen werden. Für diesen Prozessbereich wird derzeit ein quantitativer Ansatz mit Markov-Ansätzen und Histogrammen untersucht. Zusätzlich können aus LiDAR-Scans auch die Trennflächenrauigkeiten (FERNANDEZ-STEGER et al. 2011) und damit die Scherfestigkeiten auf Trennflächen nach dem Barton-Bandis Kriterium (BARTON & BANDIS 1990) abgeschätzt werden und im Bedarfsfall mit Laborversuchen ergänzt bzw. überprüft werden.

Anhand dieser Daten kann abgeschätzt werden, für welche Bereiche repräsentative 2D-Standsicherheitsbetrachtungen erstellt werden müssen. Weiterhin erlaubt aber insbesondere die hohe räumliche Auflösung und 3D-Projektion der Daten auch aus diesen heraus im Bedarfsfall 3D-FEM Modelle zu parametrisieren. Der entscheidende Vorteil bleibt hierbei, dass entsprechend dem Untersuchungsstand und -bedarf Daten in unterschiedlichem Detailgrad extrahiert oder aggregiert werden können und so schnell und wirtschaftlich auf die Projektanforderungen reagiert werden kann.

Im Zuge der bereits erfolgten Untersuchungen und erster Wiederholungsscans hat sich zudem gezeigt, dass LiDAR Daten aus der Ostböschung dabei helfen können die Verwitterungsanfälligkeit bzw. Zerfallsbeständigkeit einzelner Schichten zumindest teilquantitativ in ihrer in-situ Position zu bewerten. Durch den Vergleich multitemporaler Scans werden Massendefizite und deren räumliche Verteilung sichtbar (Abb. 8), die eine lokalspezifische Bewertung ermöglicht. Im Bedarfsfall erlaubt dies unter Berücksichtigung der Exposition und klimatischen Situation entsprechend der Idee der Beobachtungsmethode auch konstruktive Maßnahmen effizient zu dimensionieren. In derselben Wei-



se können potenzielle Steinschlagvolumina und Intensitäten abgeschätzt werden und Maßnahmen adäquat dimensioniert werden.

Letztlich erlaubt die räumliche Projektion und Überführung aller Daten in eine 3D-Software wie GoCAD auch eine Projektion in die Fläche, wodurch die Überprüfung des ingenieurgeologischen Modells mit umliegenden Aufschlüssen des Steinbruchs und mit den abgeteuften bzw. geplanten Bohrungen erleichtert wird. Durch den hohen Digitalisierungsgrad und die Georeferenzierung der Daten wird zudem der digitale Arbeitsfluss, die Evaluierung von Information und die Datenkatalogisierung erheblich vereinfacht.

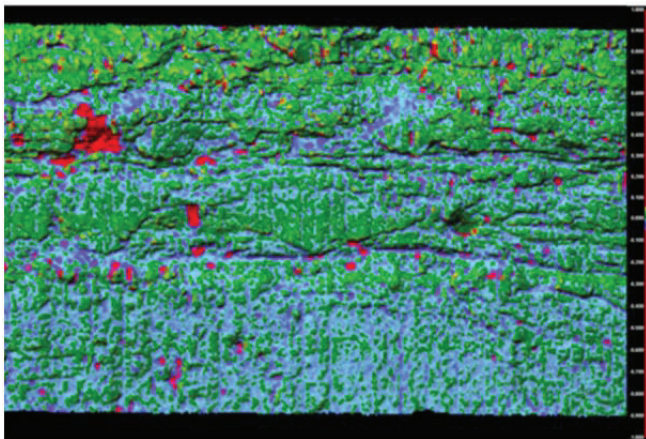


Abb. 8: 25 m x 30 m großer Teilausschnitt eines multitemporalen Vergleich zur Bestimmung von Massendefiziten (rot).

Abb. 8: 25 m x 30 m large section of a multitemporal comparison to detect mass losses (red).

6 Diskussion

Eine Trennflächenanalyse zur Ermittlung des Trennflächengefüges und der Wasserwegsamkeiten eines beliebig großen Gebirgskörpers auf Basis von TLS Daten kann hinsichtlich der wichtigsten geometrischen Trennflächenparameter wie Raumlagen und Anzahl von Trennflächenscharen, Abstand, Häufigkeit, Vernetzung und Länge im Vergleich zu manuellen Kartierungen deutlich zeitoptimierter und mit weitaus höherem Detaillierungsgrad vorgenommen werden. Die relative Häufigkeit von Trennflächenscharen kann indirekt aus der sukzessiven Trennung der automatisch ermittelten Gefügedaten qualitativ abgeschätzt werden. Jedoch wird aus den Untersuchungen ersichtlich, dass die Exposition des

Aufschlusses auf die absolute gemessene Häufigkeit der Trennflächenausbisse und deren Größe einen erheblichen Einfluss hat. Dies gilt sowohl für manuelle Messungen mit dem Gefügekompass als auch für die automatische Erfassung aus TLS-Daten. Im Vergleich liegt der Vorteil der digitalen Bearbeitung in der wesentlich besseren Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit. Zudem lassen sich Trennflächensystem und Großklüfte in ihrer räumlichen Lage in die aktuelle und zukünftige Geländegeometrie einfügen und deren Auswirkungen untersuchen. Auch Klufkörpergrößen und kinematische Analysen hinsichtlich potentieller Gleitkörper lassen sich aus den TLS-Daten leicht ableiten. Zudem können aus den geometrischen Strukturdaten die in-situ Blockgrößenverteilung, strukturelle Gesteinsanisotropien oder die Zuordnung von strukturellen Homogenbereichen ermittelt werden, die für Stand sicherheitsbewertungen und geohydraulische Modellierungen notwendig sind.

Literatur

- BARTON, N. & BANDIS, S. (1990): Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice.- Proc. Int. Conf. Rock Joints, Loen 4.-6. Juni 1990, 603-610.
- FERNANDEZ-STEGER, T.M., HU, H., WIATR, T., REICHERTER, K. & AZZAM, R. (2011): Quantifizierung der räumlichen Trennflächenrauigkeiten aus LiDAR Daten. – 18. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum für junge Ingenieurgeologen, Berlin 16.-19. März 2011, 47-54.
- HEITFELD, K.-H., KRAPP, L., LANGGUTH, H.R., OLZEM, R., STOLTIDIS, I., STORK, W., VERLEGER, H. & VÖLTZ, H. (1980): Hydrogeologische und ingenieurgeologische Karten. – Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., 4: 168 S., Aachen.
- KÖHLER, H.J. (1990): Geologischen und hydrogeologische Verhältnisse im Raum Gruiton Dornap und die Auswirkungen von Wasserhaltungsmaßnahmen in Steinbrüchen devonischer Massenkalk. - Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., 40, 198 S., Aachen.
- NGUYEN, H.T., FERNÁNDEZ-STEGER, T.M., WIATR, T., RODRIGUES, D. & AZZAM, R. (2011): Use of terrestrial laser scanning for engineering geological applications on volcanic rock slopes an example from Madeira Island (Portugal). – Nat Hazards Earth Syst Sci., 11: 807-817.
- PRIEST, S.D. (1993): Discontinuity Analysis for Rock Engineering. – 473 S., London (Chapman and Hall).