

# Integrales Monitoringkonzept an der Enguri Bogenstaumauer

Thomas Niederhuber<sup>1</sup>, Birgit Müller<sup>1</sup>, Thomas Röckel<sup>2</sup>, Mirian Kalabegishvili<sup>3</sup>, Nino Tsereteli<sup>4</sup>, Bernd Aberle<sup>5</sup>, Matthieu Rebmeister<sup>6,9</sup>, Andreas Schenk<sup>6</sup>, Jakob Weisgerber<sup>7</sup>, Malte Westerhaus<sup>7</sup>, Andreas Rietbrock<sup>8</sup>, Frank Schilling<sup>1</sup>, DAMAST Team

<sup>1</sup>Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Applied Geosciences, Karlsruhe, Germany

<sup>2</sup>Piewak & Partner GmbH, Bayreuth, Germany

<sup>3</sup>Georgian Technical University, Hydraulic Department, Tbilisi, Georgia

<sup>4</sup>Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia

<sup>5</sup>Geotechnik Aberle, Kelbra, Germany

<sup>6</sup>Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Karlsruhe, Germany

<sup>7</sup>Karlsruhe Institute of Technology, Geodetic Institute, Karlsruhe, Germany

<sup>8</sup>Karlsruhe Institute of Technology, Geophysical Institute, Karlsruhe, Germany

<sup>9</sup>now at Leica Geosystems, Heerbrugg, Switzerland

## Kurzfassung

Seit 2019 wird im Rahmen der vom BMBF geförderten Verbundprojekte DAMAST und DAMAST-Transfer an der Enguri-Talsperre in Georgien ein umfassendes Monitoringsystem aufgebaut und Daten erhoben. Dieses System zielt darauf ab, langfristige Aussagen über die Nutzung des Wasserkraftprojekts zu liefern. Hierfür wurden historische Daten, Betriebsdaten und Ergebnisse einer Vielzahl neuer und moderner Messmethoden zu einer Datensammlung zusammengeführt, die nun als Grundlage für weiterführende Analysen dient und operative Entscheidungen unterstützt. Es wurden neue Methoden entwickelt. So wurde zum ersten Mal ein GB-SAR zum geodätischen Monitoring der Deformation am Dammbauwerk über einen Zeitraum von 2,5 Jahren eingesetzt. Die Einbindung der Kräfte vor Ort und der wissenschaftliche Austausch mit den Universitäten des Landes fördern den Aufbau und den Erhalt der Expertise. Durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz strebt man die Entwicklung eines Prognose-Tools an, das den Echtzeit-Gefährdungsstand der Staumauer widerspiegelt.

## 1. Einleitung

Die Enguri-Talsperre befindet sich im Großen Kaukasus im Nordwesten Georgiens und zählt mit ca. 270 m Höhe zu den höchsten Bogenstaumauern weltweit. Sie wurde in den 1970er Jahren gebaut, 1986 fertiggestellt. Der Aufstau des Flusses Enguri im Jvari Reservoir begann 1978. Im gleichen Jahr ging das Kraftwerk in Betrieb [1]. Dies ist über einen 15 km langen Druckstollen mit dem Stausee auf einer hydraulischen Höhe von 405 m verbunden. Das maximale Stauziel der Anlage liegt bei ca. 510 m, so dass im Normalbetrieb jährliche Wasserstandsänderungen im Reservoir von um die 100 m gefahren werden. Etwa in der Mitte des Druckstollens verläuft die Grenze von Georgien und Abchasien. Das Kraftwerk selbst liegt in Abchasien. Der Enguri Staudamm spielt eine entscheidende Rolle in der sicheren Energieversorgung von Abchasien und Georgien und ist aufgrund der Lage von Stauanlage und Kraftwerk auch geopolitisch von großer Relevanz. Um dessen sicheren Betrieb in der tektonischen aktiven Region auch in Zukunft gewährleisten zu können, wurden im Rahmen der beiden BMBF geförderten DAMAST-Projekte (DAMAST und DAMAST-Transfer) umfassende Messkampagnen und Analysen durchgeführt mit dem Ziel der Entwicklung eines fachübergreifenden, integralen Prozessverständnisses.

Die Herangehensweise der DAMAST Projekte ist skalenübergreifend und reicht von kleinräumigen Beobachtungen am Dammkörper hin zu großräumigen geophysikalischen und geodätischen Messungen des regionalen Deformationsfeldes im Projektgebiet. Folgende Themen sind Schwerpunkte der DAMAST Projekte:

- Bestimmung des Sedimenteintrags in das ca. 20 km lange Jvari Reservoir
- Sediment Charakterisierung im Reservoir und dessen Mobilisierungsverhalten
- Strukturelle Deformation des Dammkörpers (GB-SAR, GNSS)
- Induzierte und natürliche Seismizität (DAS-System, Seismometer)
- Bestimmung hydraulischer Systeme im Untergrund (Tracer Tests)
- Regionale Deformationen der Erdoberfläche im Projektgebiet (GNSS, PS-InSAR)
- Regionales und lokales Spannungsfeld (Bohrlochauswertungen, Hydraulische Tests, Inverse Ansätze)
- Integration von Messdaten in ein Neuronales Netz zur Risikobeurteilung
- Charakterisierung von Störungszonen

Neben den gemessenen Parametern wurden historische Daten digitalisiert und neu prozessiert. Daten zu Reservoir-Wasserspiegel, Piezometer, Strain-Meter und Senklot wurden vom Talsperrenbetreiber bereitgestellt. Die Datensätze sind dabei räumlich und zeitlich stark unterschiedlich und reichen von Punkt über Linien bis Flächenmessungen. Einige Messdaten wurden einmalig erfasst, während die meisten Parameter mehrmals kampagnenbasiert bzw. kontinuierlich gemessen wurden und werden. Daher erfordert die Auswertung Ansätze, welche heterogene Daten (räumlich und zeitlich) verarbeiten kann und so Aussagen über das Gesamtsystem Enguri ermöglichen. Hier vorgestellt werden die Methoden, welche numerische FE-Modelle nutzen (kalibriert anhand der Messdaten), die es ermöglichen, verschiedene Belastungszenarien zu überprüfen. Ein erstes Modell verknüpft die lokalen Beobachtungen am Staudamm, während ein zweites Modell die regionalen Deformationen und Spannungsänderungen aufgrund der Wasserstandsänderungen modelliert. Zusätzlich zu den physikalisch basierten Ansätzen wurde im Rahmen der Projekte ein neuronales Netz (CNN) aufgebaut und trainiert, welches durch statistische KI-Ansätze ebenfalls geeignet ist, Daten in verschiedenen Formaten zu evaluieren. Ziel des CNN ist es ein Prognose-Tool zu etablieren, das den Echtzeit-Gefährdungsstand der Staumauer widerspiegelt und so Betreiber von Stauanlagen bei operativen Entscheidungen zur Anlagensteuerung unterstützt (Weitere Informationen in [2]).

## 2. Geologie und Spannungsfeld

Die Geologie im Untersuchungsgebiet ist geprägt von rezent andauernder Kompression in Folge der Kontinent-Kontinent Kollision der Afrikanisch-Arabischen Platte und der Eurasischen Platte. Die stärkste Konvergenz tritt dabei im östlichen Teil des Großen Kaukasus auf. Im Bereich des Enguri liegt sie in der Größenordnung weniger mm pro Jahr [6]. Infolge wurde die Eurasische Platte von Norden auf die Arabische Platte überschoben, einhergehend mit starker Verfaltung und Entwicklung großer Kluft und Störungssystem. Die Haupt-Überschiebungsbahnen verlaufen dabei NW-SE. Die dominante Struktur im Bereich des Enguri Damms stellt die Ingirishi Störung dar. Sie verläuft subvertikal in WSW-ENE Richtung und damit nahezu parallel zum Druckstollen. Kleinere Störungen, wie die Branch Fault, welche unter dem rechten Widerlager des Enguri Damms verläuft [1], stehen annähernd senkrecht zur Ingirishi Störung.

Der Untergrund unter dem Staudamm und der südliche Teil des Jvari Reservoirs werden von Kalkablagerungen der Unteren Kreide aufgebaut. Der Powertunnel erfasst auch Schichten der Oberen Kreide. Bei allen kreidezeitlichen Sedimenten handelt es sich um Karbonate, welche sich im Grad der Dolomitisierung und der Verkarstung unterscheiden. Nach Süden schließt ein Vorlandbecken, das Rioni Basin mit klastischen Tertiären und Quartären Sedimenten an. Der Untergrund des nördlichen Jvari

Reservoirs wird überwiegend durch jurassische Gesteine gebildet, welche meist vulkanischen Ursprungs sind [3].

Zur Bestimmung des lokalen und regionalen Spannungsfelds wurden existierende Daten kompiliert und mit neuen Daten kombiniert. Hierzu wurden während der ersten Projektphase vier Bohrungen (KIT 1 - 4) im Abstrom der Staumauer niedergebracht und geophysikalisch untersucht. Ergänzend wurden Analysen an den Bohrkernen der Bohrungen durchgeführt. In der zweiten Projektphase wurde eine weitere Bohrung (KIT-Spartak) reservoirseitig des linken Widerlagers abgeteuft und ebenfalls auf Spannungsindikatoren (Drilling-Induced Tensile Fractures, Petal-Centerline Fractures und Breakouts) analysiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass das lokale Spannungsfeld maßgeblich topographisch überprägt, ist [4, 5]. In der Bohrung KIT-4 wurden zur Bestimmung der Spannungsmagnituden Spannungsmessungen mit der Hydraulic Fracturing Methode durchgeführt. Hier konnte in einem numerischen Modell ebenfalls gezeigt werden, dass die gemessenen Magnituden (es wird die minimale Hauptspannung gemessen) keiner vertikalen bzw. horizontalen Hauptspannungsrichtung entsprechen. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Tiefe der Messung ab.

## 3. Strukturelle Deformation der Staumauer

Um den saisonalen Effekt der Wasserstandsänderungen von bis zu 100 m sowie die temperaturinduzierten Spannungen auf den Staudamm und das Reservoir evaluieren zu können, wurden verschiedene Techniken verwendet. Das wichtigste Messgerät in diesem Zusammenhang ist das Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR). Es ist in der Lage mittels interferometrischer Messungen im Ku-Band (1,7 cm Wellenlänge) Verschiebungen mit einer Genauigkeit  $< 1$  mm zu messen. Aufgrund starker atmosphärischer Variationen liegt die tatsächliche Messgenauigkeit des Systems am Staudamm im Bereich weniger mm. Bei der Messung werden kohärente Radarsignale ausgesendet, welche von Bauwerk direkt bzw. gestreut reflektiert werden. Durch die Verschiebung des Sensors entlang einer 2 m langen Schiene (synthetische Apertur) wird mit jeder Messung ein vollständiges Bild des Staudamms aufgenommen, wobei aus der Phaseninformation jedes Bildpunktes die individuelle Punktbeziehung abgeleitet werden kann. Damit kann die Bewegung von mehreren hundert bis tausenden Punkten gleichzeitig vermessen werden. Eine große Herausforderung ist die Zuordnung der zurückgestreuten Signale (Bildpunkte) zu den tatsächlichen 3D Punktpositionen am Damms, der sogenannten Geokodierung. Um diese trotz des ungünstigen geometrischen Settings möglichst exakt durchzuführen, wurde aus Drohnenbefliegungen ein hochaufgelöstes 3D Modell des Staudamms sowie des umliegenden Terrains angefertigt. Zudem wurde ein neuer methodischer Ansatz entwickelt, bei dem die Geokodierung mit Hilfe von Ray-Tracing und Radar-Tomographie durchgeführt wird [7]. Die

Messungen wurden von drei Beobachtungsstandorten ausgeführt, um den gesamten Dammquerschnitt erfassen zu können. Von zwei nahegelegenen Stationen am linken bzw. rechten Widerlager wurde kampagnenbasiert gemessen mit zwei Epochen pro Jahr, während von einer weiteren Station in etwa 800 m Entfernung vom Damm eine kontinuierliche Messreihe mit großer räumlicher Abdeckung aufgenommen wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Damm nicht symmetrisch verformt wird, sondern die größte horizontale Deformation vom Zentrum aus in Richtung des rechten Ufers verschoben auftritt. Die Verschiebung liegt an dieser Stelle in der Größenordnung von etwa 4 cm bei einer Wasserstandsänderung von 80 m. Ein durch die Firma Artelia erstelltes numerisches FE-Modell des Staudamms und der unmittelbaren Umgebung, kalibriert auf Basis von Inklinometermessungen sowie hydraulischen und Festigkeitsdaten konnte diese Ergebnisse unabhängig bestätigen [8].

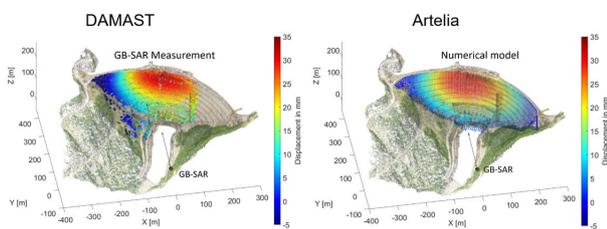


Abbildung 1: Deformation des Dammkörpers in mm. Angegeben sind die horizontalen Verschiebungsbeträge parallel in Richtung der Tal-Achse. Die Ergebnisse der GB-SAR Messungen (links: DAMAST) und des FE-Modells (rechts: Artelia) zeigen vergleichbare Verschiebungen in Lokalisierung und Magnitude.

Durch die Installation eines Environmental Sensors Networks am Damm und der unmittelbaren Umgebung werden kontinuierlich Echtzeitdaten zu Luftfeuchtigkeit, Temperatur, CO<sub>2</sub>-Partialdruck und atmosphärischem Druck von mehr als 39 Sensoren erfasst. Zusätzlich werden Windgeschwindigkeit und -richtung durch zwei weitere Messstationen überwacht. Eine Infrarotkamera misst die Wärmestrahlung an der Staumauer, während ein Sensor im Inneren des Damms Informationen zu den Parametern im Dammkörper liefert. Diese Daten können zum einen genutzt werden, um die GB-SAR Messungen zu korrigieren und somit die Genauigkeit verbessern zu können. Zum anderen ermöglichen die Daten die Berechnung von thermischen Spannungen, die periodisch auf den Damm einwirken.

#### 4. Regionale Deformation im Bereich des Jvari Reservoirs und deren Einfluss auf induzierte Seismizität

Im Rahmen des DAMAST Projekts wurde ein flächendeckendes seismisches Messnetz in der Region des Enguri Staudamms eingerichtet, um natürliche und induzierte Seismizität erfassen und lokalisieren zu können. Hierzu wurde initial ein Messnetz bestehend aus vier Seismometern an der Geländeoberfläche sowie drei

oberflächennahe und ein tiefes Seismometer installiert [9]. Dieses wurde später durch weitere Seismometer v.a. in Abchasien erweitert. Erste Ergebnisse deuten dabei auf eine negative Korrelation zwischen der Erhöhung des Wasserstandes im Jvari Reservoir und dem Auftreten induzierter Seismizität hin.

Es wurde ein fernerkundliches Messnetz bestehend aus Corner Reflektoren für satellitengestützte PSInSAR Messungen und tief gegründeten GNSS-Stationen installiert, um tektonische und auflastinduzierte Verschiebungsfelder an der Erdoberfläche im Umfeld des Enguri-Reservoirs und an der Staumauer erfassen und quantifizieren zu können. Um eine hohe Messgenauigkeit zu erhalten, werden alle Fundamente seitens des Betreibers halbjährlich mittels terrestrischen Nivellements bezüglich möglicher Senkungen, Hebungen und Neigungen überprüft. Die Genauigkeit des Nivellements liegt unter 1 mm. Bei allen bisher durchgeführten Messungen wurde kein signifikantes Setzungs- bzw. Neigungsverhalten dieser festgestellt, sodass die resultierenden Koordinatenzeitreihen der GNSS-Permanentmessungen repräsentativ für regionale Deformationen sind [10]. In den Zeitreihen der GNSS-Messungen ist eine Periodizität von ungefähr einem Jahr sichtbar, die insbesondere in der Höhenkomponente eine starke Korrelation mit dem Wasserstand des Jvari Reservoirs aufweist. Die Amplitude des jahresperiodischen Signales beträgt ca. 3 mm in der Ost-West-Komponente und ca. 7 mm in der Höhenkomponente [10].

Ein numerisches, linear elastisches FE-Modell wurde erstellt, um die Deformationsvorgänge und das Auftreten der Seismizität besser verstehen zu können. Dabei zeigen erste Analysen, vergleichbare Deformationen von rechtem und linken Uferbereich des Jvari Reservoir. Große Unterschiede konnten für den Bereich nahe dem linken Widerlager festgestellt werden, was auf die fehlende abstützende Wirkung des Gebirges durch das Einschneiden des benachbarten Magana Tals interpretiert wurde. Zur Evaluation der Seismizität wurden während des Einstaus und Abstaus auftretende Spannungskonzentrationen und Coulomb Failure Stresses (CFS) betrachtet, um mögliche Orte seismischer Ereignisse bestimmen zu können. Dabei zeigen die vorläufigen Ergebnisse, dass die Spannungsverteilungen im Untergrund des Reservoirs für eine WSW-ENE gerichtete Störungszone (Ingirishi Störung) bei niedrigem Wasserstand im Reservoir eine Reaktivierung der Störung begünstigt, während ein hoher Wasserspiegel eher hemmend wirkt.

#### 5. Fallbeispiel: Geomechanische Erklärung für Wasserverluste im Druckstollen

Während der ersten Projektphase wurden aufwändige Reparaturarbeiten am Drucktunnel durchgeführt, da zuvor Wasserverluste von mehr als 10 m<sup>3</sup>/s festgestellt wurden. Hierzu wurde der Wasserspiegel im Reservoir auf eine Höhe unterhalb des Einlasses (~405 m a.s.l.) für mehrere Monate abgesenkt und so der Wasserfluss durch den Druckstollen gestoppt. Während der

Inspektion wurden mehrere kleinere Stellen mit Rissen festgestellt, jedoch auch eine ca. 40 m lange, hangzugewandte, geöffnete Konstruktionsfuge, welcher der größte Anteil des Wasserverlustes zugesprochen wird. Für die Sanierung des Druckstollens wurde in Bereichen mit starken Karsterscheinungen Hybridzement eingesetzt. In weniger verkarsteten Bereichen wurde Zementsuspension und Kunstharz injiziert [11].

Messungen des Spannungsfeldes entlang des Drucktunnels gibt es nicht. Diese wurden aus dem numerischen Spannungsmodell und den Herdmechanismus von Erdbeben und anderen Spannungsindikatoren aus Bohrlöchern abgeleitet. Aufgrund der starken topographischen Überprägung des Fernfelds wird das Spannungsfeld senkrecht zum Drucktunnel angenommen. Unsere Vorgehensweise beinhaltet den Vergleich der Ergebnisse der numerischen Berechnung des Spannungszustands im Drucktunnel mit den im April 2021 aufgenommenen Rissen im Tunnel. Hierfür wurden verschiedene Spannungsszenarien mithilfe eines FE-Modells erstellt. Das lineare elastische 2D-Modell wird durch die Parameter Dichte = 2600 kg/m<sup>3</sup>, Poissonzahl = 0,25 und E-Modul = 45 GPa beschrieben. Für das statische Modell wurde allgemein eine grobe Vernetzung gewählt, wobei eine feine Diskretisierung an der Geländeoberfläche und im Bereich des Druckstollens erfolgte, um lokale Spannungsänderungen hochaufgelöst betrachten zu können.

Zunächst wurde der Drucktunnel im leeren Zustand berechnet. Erste Ergebnisse zeigen eine symmetrische Verteilung von Spannungskonzentrationen um den Stollen. Allerdings sind die Spannungskonzentrationen ca. 30° gegen den Uhrzeigersinn (Blickrichtung vom Reservoir zum Kraftwerk) aus der Vertikalen gedreht. Dadurch befindet sich die hangseitige Konstruktionsfuge im Bereich, in dem Zugspannungen auftreten, und kann somit bevorzugt geöffnet werden [4]. Im Betrieb befindet sich Wasser im Drucktunnel, das entsteht ein zusätzlicher Innendruck während des Betriebs und zudem wird die Tunnelwand durch eventuelle Druckstöße beim Öffnen und Schließen von Einlassventilen belastet. So ist eine Dauerhafte Öffnung der Fuge unter Betrieb denkbar [5], die den starken Wasserverlust erklären könnte. Genauere Untersuchungen, welche den gesamten dreidimensionalen Spannungszustand, den Einfluss von Karstsystemen auf dieses und verschiedene Ausbauszenarien berücksichtigt, sollen folgen.

## 6. Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen am Enguri Staudamm konnten Messdaten auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen erhoben werden. Erste Analysen koppeln dabei meist mehrere Einflussfaktoren in numerischen Modellen. So konnte der Einfluss periodischer Wasserstandsänderungen auf die Deformation der Staumauer unter Verwendung drohnengestützter 3D Gelände und Staumauermodelle, GB-SAR Messungen, Inclinometer Messungen, Festigkeitsdaten und Staumauergeometrie gezeigt werden. Großskalige numerische

Modelle können Informationen zum Deformationsverhalten der Stauseeränder geben und zeigen, unter welchen Bedingungen erhöhte Seismizität zu erwarten ist.

Im finalen integralen Monitoringkonzept sollen die bestehenden Modelle um weite Daten erweitert werden. Diese sind nötig, um Parameter in ein gleiches Format zu überführen. Numerische Modelle können genutzt werden um die Daten, welche nicht kontinuierlich gemessen werden, nicht nur statistisch zu interpolieren, sondern physikalisch basiert zu berechnen. Modelldaten, Geometrien und Messdaten sollen dann genutzt werden, um ein CNN zu trainieren, welches somit ein integrales Monitoring ermöglicht.

Um die Qualität der Vorhersagen verbessern zu können, müssen möglichst viele und lange Messreihen, welche nicht numerisch modelliert werden können, in das CNN einfließen, um so für möglichst jedes seismische, meteorologische, hydraulische Szenario valide Aussagen zur Gefährdung liefern zu können. Aktuell umfassen die meisten Zeitreihen einen Beobachtungszeitraum von wenigen Jahren. In dieser Zeit wurden zudem längere Sanierungsmaßnahmen am Druckstollen durchgeführt, wodurch der Wasserstand über ca. 3 Monate unterhalb des Einlasses zum Druckstollen lag. Danach wurde das Kraftwerk in einem veränderten Modus gefahren, sodass die jahreszeitlichen Wasserstandsänderungen deutlich von den Änderungen der vorherigen Dekade abweichen. Mit längeren Messreihen und kampagnenbasierten Messungen muss zukünftig gezeigt werden, wie repräsentativ die Daten dieser Jahre sind und ob die Daten geeignet sind ein CNN zu trainieren. Daher ist auch ein Basismonitoring mit reduzierter Instrumentierung nach Projektende im Jahr 2024 geplant.

## Danksagung / Angaben zu Fördermittelgebern

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung der Projekte DAMAST und DAMAST-Transfer als Teil von "CLIENT II - Internationale Partnerschaft für nachhaltige Innovationen", einem Förderprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen "Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA<sup>3</sup>)". BMBF-Project 03G0882A – DAMAST and DAMAST-Transfer

Ein weiterer Dank geht an den Staudambetreiber Engurhesi für die Unterstützung bei der Bereitstellung von Daten, Infrastruktur, Installation und Wartung von Messgeräten. Des Weiteren wollen wir uns bei den georgischen Kollegen bedanken, welche durch ihren persönlichen Einsatz und Verhandlungsgeschick das Projekt erfolgreich mit gesteuert haben.

## Kontakt Daten

Adenauerring 20b

76131 Karlsruhe

## Literaturverzeichnis

- [1] Chelidze, T., Matcharashvili, T., Abashidze, V., Tsaguria, T., Dovgal, N., Zhukova, N. (2019): Complex dynamics of fault zone deformation under large dam at various time scales, in: *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 5, 437-455. <https://doi.org/10.1007/s40948-019-00122-3>
- [2] Ottenburger, S.S., Trybushnyi, D., Rebmeister, M., Karamzadeh, N., Quandt, D., Möhrle, S., Ünal, O., Bosch, J., Müller, T., Haller, C., Schenk, A., Kron, A., Müller, B. (2023): AI-assisted analysis of correlations of dam deformation, seismic events, meteorology, and water level changes, in: *Symposium "Management for Safe Dams" - 91st Annual ICOLD Meeting – Gothenburg 13-14 June 2023*.
- [3] Djanelidze, A., & Kandelaki, N. (1956). Geological map of the USSR, Caucasus series sheet K-38-XIII. Ministry of Geology, Moscow.
- [4] Niederhuber, T., Müller, B. I., Röckel, T., Kalabegishvili, M., Schilling, F., Aberle, B. (2022): Geomechanics in Underground Technologies for Renewable Energy supply: The example of Enguri power tunnel leakage. In: *DGMK/ÖGEW Frühjahrstagung 2022–Geo-Energy-Systems and Subsurface Technologies–Key Elements towards a Low Carbon World (2022), Celle, Deutschland, 15.06.2022–16.06.2022*, 359-363, ISBN 978-3-947716-41-8
- [5] Niederhuber, T., Müller, B., Röckel, T., Kalabegishvili, M., Schilling, F., Aberle, B. (2022): Geomechanical explanation of the Enguri power tunnel leakage. in: *EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU22-11830)*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11830>
- [6] Kadirov, F. A., Floyd, M., Reilinger, R., Alizadeh, A. A., Guliyev, I. S., Mammadov, S. G., Safarov, R. T. (2015): Active geodynamics of the Caucasus region: implications for earthquake hazards in Azerbaijan. In: *Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth*, 3, 3-17.
- [7] Rebmeister, M., Auer, S., Schenk, A., Hinz, S. (2022): Geocoding of ground-based SAR data for infrastructure objects using the Maximum A Posteriori estimation and ray-tracing, in: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 189, 110-127. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.04.030>
- [8] Rebmeister, M., Schenk, A., Hinz, S., Adrian, F., Vonie, M. (2023): High Dam monitoring with Ground-Based SAR: Opportunities and Challenges, in: *Symposium "Management for Safe Dams" - 91st Annual ICOLD Meeting – Gothenburg 13-14 June 2023*.
- [9] Karamzadeh, N., Tsereteli, N., Gaucher, E., Tugushi, N., Shubladze, T., Varazanashvili, O., Rietbrock, A. (2023): Seismological study around the Enguri dam reservoir (Georgia) based on old catalogs and ongoing monitoring, in: *Journal of Seismology*, 27(6), 953-977. <https://doi.org/10.1007/s10950-023-10173-5>
- [10] Weisgerber, J., Rebmeister, M. (2022): Deformationsmonitoring an der Enguri-Staumauer im Kaukasusgebirge, Georgien, in: *DVW Baden-Württemberg e.V., Heft 1/2022*, ISSN 0940-2942
- [11] Aberle, B. (2023): Rehabilitation work on the Enguri dam pressure tunnel. in: *Wasserwirtschaft*, 113(6), 64-67.