# Monitoringkonzept für die Enguri-Bogenstaumauer, Georgien

An der Enguri-Bogenstaumauer wird seit 2019 an Methoden für ein umfassendes Monitoringsystem geforscht. Ziel ist es, Zusammenhänge verschiedener Prozesse und Mechanismen aufzuzeigen sowie Empfehlungen zum sicheren Betrieb der Anlage abzuleiten. Datengrundlage sind historische und aktuelle Betriebsdaten sowie Ergebnisse neuer Messungen. Neben etablierten Methoden wurden neue Konzepte, wie das GB-SAR zur Deformationsüberwachung der Staumauer, erfolgreich getestet und Methoden der künstlichen Intelligenz eingesetzt.

Thomas Niederhuber, Birgit Müller, Thomas Röckel, Mirian Kalabegishvili, Nino Tsereteli, Bernd Aberle, Matthieu Rebmeister, Andreas Schenk, Jakob Weisgerber, Malte Westerhaus, Andreas Rietbrock und Frank R. Schilling

## 1 Einleitung

Die Enguri-Talsperre im Großen Kaukasus im Nordwesten Georgiens zählt mit einer Höhe von rund 270 m zu den höchsten Bogenstaumauern der Welt. Der Bau begann in den 1970er-Jahren und wurde 1986 abgeschlossen. Die Flutung des Enguri-Flusses in den Jvari-Stausee begann 1978, und im selben Jahr wurde das Kraftwerk in Betrieb genommen [1]. Ein 15 km langer Druckstollen verbindet das Kraftwerk mit dem Stausee, der auf einer hydraulischen Höhe von 405 m liegt (**Bild 1**). Das maximale Stauziel der Anlage liegt bei ca. 510 m, was im Normalbetrieb zu jährlichen Wasserspiegelschwankungen im Stauraum von ca. 100 m führt. Die Grenze zu Abchasien verläuft etwa in der Mitte des Druckstollens, wobei das Kraftwerk in Abchasien liegt. Die Enguri-Staumauer spielt eine entscheidende Rolle für die sichere Energieversorgung Georgiens und das nicht unter georgischer Kontrolle stehende Abchasien. Er ist aufgrund seiner geographischen Lage daher von großer geopolitischer Bedeutung.

Um den sicheren Betrieb in dieser tektonisch aktiven Region auch in Zukunft zu gewährleisten, wurden im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten DAMAST-Projekte (DAMAST und DAMAST-Transfer) umfangreiche Messkampagnen und Analysen durchgeführt. Hauptziel war es, ein umfassendes, interdisziplinäres Prozessverständnis zu entwickeln. Die DAMAST-Projekte verfolgen einen skalenübergreifenden Ansatz, der von detaillierten Beobachtungen an der Staumauer bis hin zu großräumigen geophysikalischen und geodätischen Messungen des regionalen Deformationsfeldes im Projektgebiet reichen. Die Schwerpunkte der DAMAST-Projekte umfassen folgende:

- Sedimenthaushalt (Sedimenteintrag in das ca. 20 km lange Jvari-Reservoir),
- Charakterisierung der Sedimente im Jvari-Reservoir und Bestimmung des Mobilisierungsverhalten bei verschiedenen Wasserständen,
- Strukturelle Deformation der Enguri-Staumauer (GB-SAR, GNSS),
- Erfassen induzierter und natürlicher Seismizität (DAS-System, Seismometer),
- Bestimmung hydraulischer Fließsysteme im Untergrund (Tracerversuche),
- Bestimmung der regionalen Deformationen der Erdoberfläche im Projektgebiet (GNSS, PS-InSAR),
- Bestimmung des regionalen und lokalen Spannungsfelds (Bohrlochauswertungen, Hydraulische Tests, Analyse von Erdbebendaten),
- Integration von Messdaten in ein Neuronales Netz zur KI-basierten Risikobeurteilung,
- Geologische Kartierung und Identifikation von Störungszonen.

In allen Arbeitspaketen wurden neue Daten erhoben. Diese Datensätze variieren jedoch stark in räumlicher sowie zeitlicher Dimension und umfassen Punkt-, Linien- und Flächenmessungen. Einige Daten wurden einmalig erhoben, während die meisten Parameter mehrfach kampagnenbasiert oder kontinuierlich gemessen wurden und werden.

Zusätzlich zu den gemessenen Parametern wurden historische Daten digitalisiert und aufbereitet. Der Talsperrenbetreiber stellte Daten zu Stauspiegellagen, Piezometern, Strainmetern sowie Pendel- und Schwimmlote zur Verfügung. Wie bei den neuen Messdaten unterscheiden sich hier die Daten räumlich und zeitlich. Die Auswertung erfordert daher Ansätze, die heterogen aufgelöste Daten (räumlich und zeitlich) verarbeiten können, um Erkenntnisse über das Enguri-System zu gewinnen.

### Kompakt

- GB-SAR mit hochauflösendem, flächenhaftem Staumauermonitoring als Erweiterung zu Pendel- und Schwimmloten wurde eingesetzt.
- Die Detektion erhöhter seismischer Aktivität bei niedrigem Wasserstand erfolgte in Übereinstimmung mit gebirgsmechanischen Überlegungen.
- Das Monitoringsystem ermöglicht physikalisch basierte und durch Daten validierte FE-Modelle zur Prognose von skalenübergreifenden Deformationen.

In diesem Beitrag werden Methoden vorgestellt, die auf numerischen FE-Modellen basieren und anhand von Messdaten kalibriert wurden. Diese Modelle ermöglichen die Untersuchung verschiedener Belastungsszenarien. Ein erstes Modell berücksichtigt lokale Beobachtungen an der Staumauer, während ein zweites Modell regionale Deformationen und Spannungsänderungen aufgrund von Wasserstandsänderungen modelliert.

Zusätzlich zu den physikalisch basierten Ansätzen wurde im Rahmen der Projekte ein Neuronales Netzwerk (CNN) entwickelt und trainiert. Dieses CNN verwendet Methoden der statistischen KI, um Daten in verschiedenen Formaten auszuwerten. Ziel ist es, ein Prognosewerkzeug zu entwickeln, das den Gefährdungszustand der Stauanlage in Echtzeit widerspiegelt und die Betreiber von Stauanlagen bei operativen Entscheidungen zur Anlagensteuerung unterstützt. Für weitere Informationen siehe Ottenberger et al. [2].

## 2 Geologie und Spannungsfeld

Die Geologie des Untersuchungsgebietes ist durch eine andauernde Kompression gekennzeichnet, die aus der Kollision der afrikanisch-arabischen und der eurasischen Platte resultiert. Die stärkste Konvergenz ist im östlichen Teil des Großen Kaukasus zu beobachten, wo im Bereich des Enguri-Stausees eine jährliche Bewegung von wenigen Millimetern beobachtet wurde [6]. Diese Bewegung führte zu einer Überschiebung der Eurasischen Platte über die Arabische Platte, begleitet von intensiver Faltung und der Bildung eines ausgedehnten Systems von Brüchen und Verwerfungen. Die Hauptüberschiebungsbahnen verlaufen in Nordwest-Südost-Richtung. Im Bereich der Enguri-Staumauer stellt die Ingirishi-Störung die dominante tektonische Struktur dar. Diese Blattverschiebung verläuft nahezu parallel zum Druckstollen, während kleinere Störungen, wie die Nebenverwerfungen, nahezu senkrecht zur Ingirishi-Störung verlaufen [1].

Der Untergrund unter der Staumauer und dem südlichen Teil des Jvari-Reservoirs wurde mit mehreren Bohrungen (KIT-1, KIT-2, KIT-3, KIT-4, KIT-Spartak) erschlossen und besteht hauptsächlich aus Ablagerungen der Unterkreide, während der Druckstollen auch durch Schichten der Oberkreide verläuft. Diese Kreidesedimente bestehen hauptsächlich aus Karbonaten, die sich im Grad der Dolomitisierung und Verkarstung unterscheiden. Im Süden schließt sich das Rioni-Becken, ein Vorlandbecken an, das klastische tertiäre und quartäre Sedimente enthält. Der Untergrund des nördlichen Jvari-Beckens besteht hauptsächlich aus jurassischen Gesteinen, die größtenteils vulkanischen Ursprungs sind [3].

Um das lokale und regionale Spannungsfeld zu bestimmen, wurden vorhandene Spannungsdaten zusammengestellt und mit

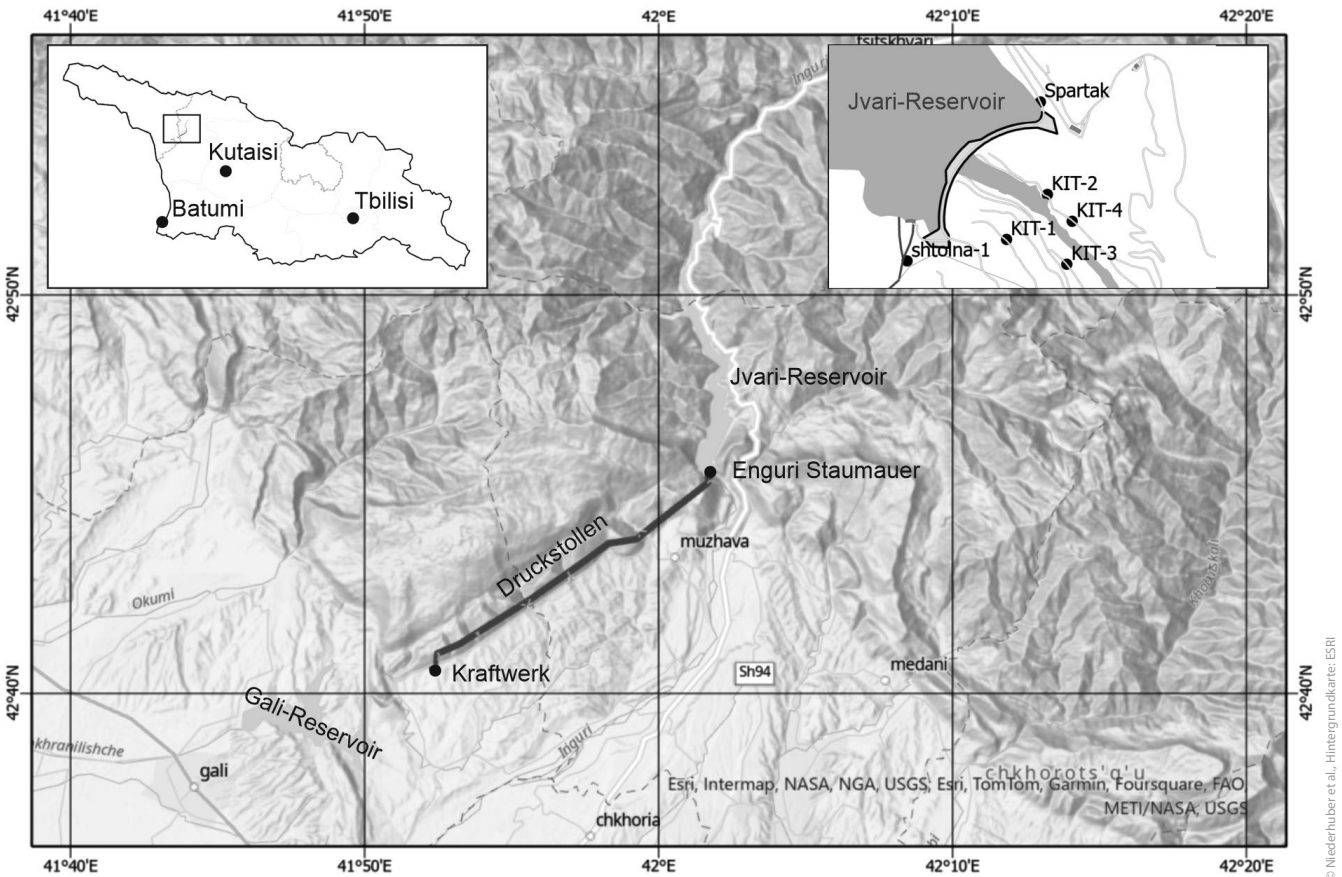


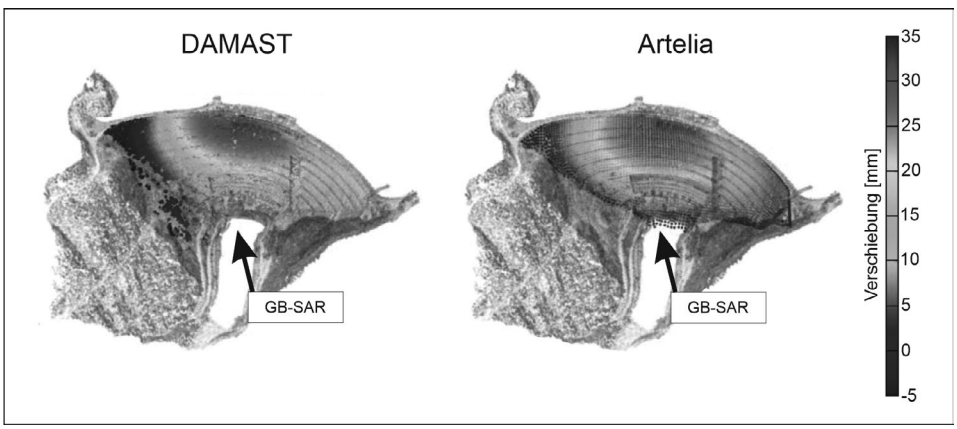

**Bild 1:** Übersichtskarte mit Lage der Stauanlage in Georgien (oben links), der Lage des oberen Jvari- und unteren Gali-Reservoirs, der Enguri Staumauer, des Kraftwerks und des Druckstollens sowie oben rechts eine Vergrößerung der Staumauer mit den Bohrungen KIT-1 bis 4, Shtolna-1 und Spartak

neuen Daten kombiniert. In der ersten Projektphase wurden vier Bohrungen (KIT-1 - KIT-4) im Bereich unterhalb der Staumauer abgeteuft und geophysikalisch sowie mit bildgebenden Verfahren untersucht. Diese umfassen unter anderem optische und akustische Televiewer-Messungen (OBI und ABI) sowie Gamma-Ray (GR). Zusätzlich wurden Analysen an den Bohrkernen durchgeführt, welche mit einem CoreScan3 digitalisiert und anschließend inventarisiert wurden. In der zweiten Projektphase wurde eine weitere Bohrung (KIT-Spartak) auf der Stauraumseite des linken Widerlagers abgeteuft und ebenfalls mit genannten Verfahren auf Spannungsinduktoren (Bohrungsinduzierte Zugrisse, Petal-Centerline-Risse und Bohrlochrandausbrüche) und Geologie hin untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass das lokale Spannungsfeld in seiner Richtung in hohem Maße von der Topographie des Großen Kaukasus beeinflusst wird [4], [5]. In der Bohrung KIT-4 wurden Spannungsmessungen mit der Hydraulic-Fracturing-Methode durchgeführt, um die Spannungsmagnituden zu bestimmen. Auch hier konnte gezeigt werden, dass die gemessenen Magnituden nicht der vertikalen oder horizontalen Hauptspannungsrichtungen entsprechen, sondern auch in ihrer Richtung verkippt sind, was auf den topographischen Effekt zurückzuführen ist. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Tiefe der Messungen ab.

## 3 Strukturelle Deformation der Staumauer

Um die jahreszeitlichen Auswirkungen der Wasserspiegelschwankungen von bis zu 100 m im Reservoir sowie die temperaturinduzierten Spannungen an der Staumauer auf das Deformationsverhalten der Staumauer zu erfassen, wurden verschiedene Techniken eingesetzt. Eine wesentliche Rolle spielt dabei das Ground-Based-Synthetic-Aperture-Radar (GB-SAR), das durch interferometrische Messungen im Ku-Band (1,7 cm Wellenlänge) Verschiebungen mit einer Genauigkeit von <1 mm erfassen kann. Aufgrund der starken atmosphärischen Schwankungen ist die tatsächliche Messgenauigkeit des Systems an der Enguri-Staumauer etwas schlechter und liegt im Bereich weniger mm. Das System sendet kohärente Radarsignale aus, die von der Struktur reflektiert werden. Durch Verschieben des Sensors entlang einer 2 m langen Schiene (synthetische Apertur) wird bei jeder Messung ein vollständiges 2-D-Bild der Staumauer aufgenommen, wobei aus der Phaseninformation jedes Bildpunktes auf die individuelle Punktbewegung geschlossen werden kann. Auf diese Weise können die Bewegungen von mehreren hundert bis tausend Referenzpunkten an der Staumauer gleichzeitig gemessen werden. Eine große Herausforderung besteht darin, die zurückgestreuten Signale (Bildpunkte) den tatsächlichen 3-D-Punktpositionen an der Staumauer zuzuordnen, was als Geocodierung bezeichnet wird. Um dies trotz der ungünstigen geometrischen Verhältnisse möglichst genau durchführen zu können, wurde ein hochaufgelöstes 3-D-Modell der Staumauer und des umliegenden Geländes aus Drohnenbefliegungen erstellt. Zusätzlich wurde ein neuer methodischer Ansatz entwickelt, bei dem die Geokodierung mit Hilfe von Raytracing und Radartomographie durchgeführt wurde [7]. Die Messungen wurden von drei Beobachtungspunkten aus durchgeführt, um den gesamten Dammquerschnitt zu erfassen. Von zwei nahegelegenen Stationen am linken und rechten Widerlager wurden kampagnenbasierte Messungen mit zwei Zyklen pro Jahr durchgeführt, während von einer weiteren Station in ca. 800 m Entfernung von der Staumauer eine kontinuierliche Messreihe mit großer räumlicher Abdeckung aufgezeichnet wurde.

Die Ergebnisse zeigen eine asymmetrische Verformung der Staumauer, bei der die größte Verformung nicht mittig, sondern von der Mitte in Richtung des rechten Ufers hin verschoben ist. Die maximale horizontale Verschiebung bei einer Wasserspiegeländerung von 80 m liegt in der Größenordnung von 4 cm. Ein numerisches FE-Modell der Staumauer und seiner unmittelbaren Umgebung, das von der Firma Artelia auf der Grundlage von Pendel- und Schwimmlote sowie hydraulischen Daten und Festigkeitsdaten erstellt wurde, konnte diese Ergebnisse im Grunde unabhängig bestätigen (**Bild 2**) [8]. Betrachtet man die Differenzen zwischen den modellierten und den gemessenen Verschiebungen, so zeigt sich, dass diese genau in dem Bereich am größten sind, in dem keine Pendel- und Schwimmlote zur Kalibrierung des FE-Modells vorliegen.




© Rebmeister, Schenk und Andrian (Artelia), basierend auf [8]

**Bild 2:** Verformung der Staumauer in Millimetern; dargestellt sind die horizontalen Verschiebungsbeträge entlang der Talachse; die Ergebnisse der GB-SAR-Messungen (links: DAMAST) und des FE-Modells (rechts: Artelia) zeigen vergleichbare Verschiebungen in Bezug auf Lage und Größe

In der zweiten Projektphase wurden mehr als 39 Sensoren eines Umweltsensornetzwerkes an der Staumauer selbst und in deren Umfeld installiert, welche kontinuierlich Echtzeitdaten zu Feuchte, Temperatur, $CO_2$-Partialdruck und Luftdruck bereitstellen. Zusätzlich überwachen zwei weitere Messstationen Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Eine Infrarotkamera misst die Wärmestrahlung an der Staumauer und ein Sensor im Inneren der Mauer liefert Informationen über die Parameter im Inneren. Diese Daten sollen in Zukunft genutzt werden, um die GB-SAR-Messungen zu korrigieren und

damit die Genauigkeit zu verbessern. Die Daten sollen aber auch genutzt werden, um thermische Spannungen, die periodisch auf die Staumauer einwirken, zu bestimmen.

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

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts lag auf der Erfassung von Erdbeben und wie diese mit Aktivitäten an der Stauanlage korrelieren. Da das ursprünglich beim Bau installierte seismische Messnetz in den Folgejahren immer weiter reduziert wurde, so dass vor Projektbeginn nur noch eine Station in 45 km Distanz vorhanden war, wurde im Rahmen des DAMAST-Projekts ein flächendeckendes seismisches Messnetz im Bereich der Enguri-Staumauer zur Erfassung und Lokalisierung der natürlichen und induzierten Seismizität aufgebaut. Dieses bestand zunächst aus vier Oberflächenseismometern, drei oberflächennahen Seismometern und einem Tiefenseismometer [9]. Später wurde dieses Netz durch zusätzliche Seismometer, insbesondere in Abchasien, erweitert. Erste vorläufige Ergebnisse deuten auf eine negative Korrelation zwischen dem Anstieg des Wasserspiegels im Jvari-Reservoir und dem Auftreten induzierter Seismizität hin.

Darüber hinaus wurde ein Fernerkundungsmessnetz bestehend aus Corner-Reflektoren für satellitengestützte PSInSAR-Messungen und tief gegründeten GNSS-Stationen aufgebaut, um tektonische und lastinduzierte Verschiebungsfelder an der Erdoberfläche in der Umgebung des Jvari-Reservoirs und der Staumauer zu erfassen und zu quantifizieren. Um eine hohe Messgenauigkeit zu gewährleisten, werden alle Fundamente halbjährlich durch terrestrische Nivellements mit einer Genauigkeit von weniger als 1 mm auf mögliche Senkungen, Hebungen und Neigungen überprüft. Bisher wurden keine signifikanten Setzungs- oder Neigungsänderungen festgestellt, so dass die resultierenden Koordinatenzeitreihen der GNSS-Permanentmessungen als repräsentativ für die regionalen Deformationen einzuordnen sind [10]. Die Zeitreihen der GNSS-Messungen zeigen eine jährliche Periodizität, die insbesondere in der Höhenkomponente stark mit dem Wasserstand des Jvari-Reservoirs korreliert. Die Amplitude dieses jährlichen Signals beträgt ca. 3 mm in der Ost-West-Komponente und ca. 7 mm in der Höhenkomponente [10].

Um die Deformationsprozesse und das Auftreten von Seismizität besser zu verstehen, wurde ein numerisches linear-elastisches FE-Modell entwickelt. Erste Analysen zeigen vergleichbare Deformationen im rechten und linken Uferbereich des Jvari-Reservoirs. Größere Unterschiede wurden jedoch im Bereich des linken Widerlagers festgestellt. Dies wird auf die fehlende Stützwirkung des Gebirges durch den Einschnitt des benachbarten Magana-Tals zurückgeführt. Zur Beurteilung der Seismizität wurden Spannungskonzentrationen und Coulomb-Failure-Stresses (CFS) während des Ein- und Ausstaus untersucht, um mögliche Orte seismischer Ereignisse zu identifizieren. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass ein niedriger Wasserstand im Reservoir die Reaktivierung der Störung begünstigt, während ein hoher Wasserstand diese eher hemmt. Dies ist in guter Übereinstimmung mit der beobachteten Seismizität.

## 5 Fallbeispiel: Geomechanische Erklärung für Wasserverluste im Druckstollen

In der ersten Projektphase wurden umfangreiche Reparaturarbeiten am Druckstollen durchgeführt, um den zuvor festgestellten Wasserverlust von mehr als 10 m³/s zu reduzieren. Dazu wurde der Wasserspiegel im Reservoir für mehrere Monate auf ein Niveau unterhalb des Einlaufs (~405 m ü. NN) abgesenkt, um den Wasserfluss durch den Druckstollen zu stoppen. Bei der Inspektion wurden mehrere kleinere Risse sowie eine ca. 40 m lange, hangseitig offene Arbeitsfuge entdeckt, die als Hauptursache für den Wasserverlust identifiziert wurde. Für die Sanierung des Druckstollens wurde in stark verkarsteten Bereichen Hybridzement verwendet, während in weniger verkarsteten Abschnitten Zementsuspension und Kunstharz injiziert wurde [11].

Es existieren keine Messungen des Spannungsfeldes entlang des Druckstollens. Daher wurde das Spannungsfeld aus dem großskaligen numerischen Spannungsmodell, welches zur Bestimmung der regionalen Deformation erstellt wurde, sowie aus dem Herdmechanismus von Erdbeben und anderen Spannungsindikatoren aus Bohrungen abgeleitet. Aufgrund der starken Topografie und den Erfahrungen der Spannungsmessungen am Enguri wurde angenommen, dass die maximale horizontale Hauptspannung senkrecht zum Drucktunnel verläuft. In unserer Analyse wurden die Spannungsverteilungen resultierend aus einem numerischen Modell des Drucktunnels mit den im April 2021 festgestellten Rissen verglichen. Das linear-elastische 2-D-Modell wird durch die Parameter Dichte mit 2 600 kg/m³, Poissonzahl 0,25 und Elastizitätsmodul von 45 GPa beschrieben. Für das statische Modell wurde eine grobe Vernetzung gewählt, wobei an der Geländeoberfläche und im Bereich des Druckstollens eine feinere Diskretisierung erfolgte, um lokale Spannungsänderungen detailliert betrachten zu können.

Zunächst wurde die Spannungsverteilung um den Druckstollen ohne Wasserinnendruck berechnet. Die ersten Ergebnisse zeigen eine symmetrische Verteilung der Spannungskonzentrationen um den Stollen. Allerdings sind die Spannungskonzentrationen um ca. 30° gegen den Uhrzeigersinn (Blickrichtung vom Reservoir zum Kraftwerk) aus der Vertikalen gedreht. Dadurch liegt die hangseitige Bauwerksfuge im Bereich der auftretenden Zugspannungen und kann bevorzugt geöffnet werden [4]. Im Betrieb befindet sich Wasser im Druckstollen, wodurch ein zusätzlicher Innendruck entsteht und die Tunnelwand durch mögliche Druckstöße beim Öffnen und Schließen der Regulierorgane beansprucht wird. Somit ist eine permanente Öffnung der Dichtung während des Betriebes möglich [5], was zu hohen Wasserverlusten führt. Weitere Untersuchungen, die den gesamten dreidimensionalen Spannungszustand, den Einfluss von Karstsystemen und verschiedene Ausbauszenarien berücksichtigen, sind geplant.

## 6 Zusammenfassung

Während der Untersuchungen an der Enguri-Staumauer wurden Messdaten auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen erhoben. Erste Analysen integrieren häufig mehrere Einfluss-

faktoren in numerische Modelle. So konnte der Einfluss periodischer Wasserspiegelschwankungen auf die Verformung der Staumauer mit Hilfe von 3-D-Gelände- und Staumauermodellen, GB-SAR-Messungen, Inklinometermessungen, Festigkeitsdaten und der Geometrie der Staumauer gezeigt werden. Großmaßstäbliche numerische Modelle geben Aufschluss über das Deformationsverhalten der Stauseeränder und zeigen, unter welchen Bedingungen mit erhöhter Seismizität zu rechnen ist.

Im finalen integralen Monitoringkonzept sollen die bestehenden Modelle mit neuen Daten und Zeitreihen erweitert werden. Diese Modelle sollen genutzt werden, um die räumlich und zeitlich variablen Parameter in ein einheitliches Format zu überführen. Numerische Modelle können verwendet werden, um Daten, die nicht kontinuierlich gemessen werden, nicht nur statistisch zu interpolieren, sondern auch physikalisch zu berechnen. Modelldaten, Geometrien und Messdaten werden dann verwendet, um ein Convolutional Neural Network (CNN) zu trainieren, das eine integrale Überwachung ermöglicht.

Zur Verbesserung der Prognosegüte müssen möglichst viele und lange Messreihen, die nicht numerisch modelliert werden können, in das CNN integriert werden, um für möglichst alle seismischen, meteorologischen und hydraulischen Szenarien valide Aussagen zur Gefährdung machen zu können. Die meisten Zeitreihen umfassen derzeit einen Beobachtungszeitraum von nur wenigen Jahren. In diesem Zeitraum wurden auch längere Sanierungsmaßnahmen am Druckstollen durchgeführt, wodurch der Wasserspiegel für ca. 3 Monate unterhalb des Einlaufs in den Druckstollen lag. Danach wurde das Kraftwerk in einer geänderten Betriebsweise gefahren, so dass die jahreszeitlichen Wasserstandsschwankungen deutlich von denen der vorangegangenen Dekade abwichen. In Zukunft muss sich zeigen, wie repräsentativ die Daten aus diesen Jahren sind und ob sie für das Training eines CNN geeignet sind, indem längere Messreihen und Kampagnenmessungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist auch ein Basismonitoring mit reduzierter Instrumentierung nach Projektende im Jahr 2024 in Planung.

## Dank

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung der Projekte DAMAST und DAMAST-Transfer im Rahmen von „CLIENT II - Internationale Partnerschaft für nachhaltige Innovationen“, einem BMBF-Förderprogramm im Rahmen von „Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA³)“. BMBF-Projekt 03G0882A - DAMAST und DAMAST-Transfer. Ein weiterer Dank geht an den Staumauerbetreiber Engurhesi für die Unterstützung bei der Bereitstellung von Daten, Infrastruktur, Installation und Wartung der Messgeräte. Unser Dank gilt auch den georgischen Kollegen, die durch ihren persönlichen Einsatz und ihr Verhandlungsgeschick das Projekt zum Erfolg geführt haben. Abschließend wollen wir noch Frédéric Andrian (Artelia) für die Bereitstellung des FE-Modells und den wissenschaftlichen Austausch danken. Ein besonderer Dank gilt auch allen nicht in der Autorenliste genannten Kollegen des DAMAST-Teams, welche zum Erfolg des Projekts beigetragen haben.

## Autoren

**Thomas Niederhuber, M. Sc.**
**Dr. Birgit Müller**
**Prof. Dr. Frank R. Schilling**
Karlsruher Institut für Technologie - AGW-TP
Adenauerring 20b
76131 Karlsruhe
thomas.niederhuber@kit.edu
birgit.mueller@kit.edu
frank.schilling@kit.edu

**Dr. Thomas Röckel**
Piewak & Partner GmbH
Jean-Paul-Str. 30
95444 Bayreuth
thomas.roeckel@piewak.de

**Prof. Dr. Mirian Kalabegishvili**
Georgian Technical University - Hydraulic Department
77 Costava st.
0175 Tbilisi, Georgien
kalabegishvili@hotmail.com

**Prof. Dr. Nino Tsereteli**
I. Javakhishvili State University - Institute of Geophysics
Alexidze 1
0160 Tbilisi, Georgien
nino_tsereteli@tsu.ge

**Dipl. -Ing. Bernd Aberle**
Geotechnik Aberle
Ziegelhüttenstraße 3
06537 Kelbra
geotechnik@aberle.biz

**Dr. Matthieu Rebmeister**
(ehemals KIT, jetzt Leica Geosystems, Heerbrugg)
**Dr. Andreas Schenk**
Karlsruher Institut für Technologie - IPF
Engesserstraße 6
76131 Karlsruhe
matthieu.rebmeister@leica-geosystems.com
andreas.schenk@kit.edu

**Jakob Weisgerber, M. Sc.**
**Dr. Malte Westerhaus**
Karlsruher Institut für Technologie - GIK
Kaiserstr. 14
76131 Karlsruhe
jakob.weisgerber@kit.edu
malte.westerhaus@kit.edu

**Prof. Dr. Andreas Rietbrock**
Karlsruher Institut für Technologie - GPI
Hertzstrase 16
76187 Karlsruhe
andreas.rietbrock@kit.edu

## Literatur

[1] Chelidze, T.; Matcharashvili, T.; Abashidze, V.; Tsaguria, T.; Dovgal, N.; Zhukova, N.: Complex dynamics of fault zone deformation under large dam at various time scales. In: Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources 5 (2019), S. 437-455(doi.org/10.1007/s40948-019-00122-3).

[2] Ottenburger, S. S.; Trybushnyi, D.; Rebmeister, M. et al.: 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, 2023.
[3] Djanelidze, A.; Kandelaki, N.: Geological map of the USSR. Caucasus series sheet K-38-XIII. Ministry of Geology, Moskau, 1956.
[4] Niederhuber, T.; Müller, B. I.; Röckel, T.; Kalabegishvili, M.; Schilling, F.; Aberle, B.: Geomechanics in Underground Technologies for Renewable Energy supply: The example of Enguri power tunnel leakage. In: DGMK/ÖGEW Frühjahrstagung 2022, Celle, 2022, S. 359-363.
[5] Niederhuber, T.; Müller, B.; Röckel, T.; Kalabegishvili, M.; Schilling, F.; Aberle, B.: Geomechanical explanation of the Enguri power tunnel leakage. In: EGU General Assembly Conference Abstracts (2022), S. EGU22-11 830 (doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11830).
[6] Kadirov, F. A.; Floyd, M.; Reilinger, R. et al.: Active geodynamics of the Caucasus region: implications for earthquake hazards in Azerbaijan. In: Proceedings of Azerbaijan National Academy of Sciences, The Sciences of Earth (2015), Nr. 3, S. 3-17.
[7] Rebmeister, M.; Auer, S.; Schenk, A.; Hinz, S.: 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 Sens-ing, 189 (2022), S. 110-127 (doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.04.030).
[8] Rebmeister, M.; Schenk, A.; Hinz, S.; Adrian, F.; Vonie, M.: High Dam monitoring with Ground-Based SAR: Opportunities and Challenges. In: Symposium „Management for Safe Dams", 91st Annual ICOLD Meeting. Gothenburg, 2023.
[9] Karamzadeh, N.; Tsereteli, N.; Gaucher, E. et al.: Seismological study around the Enguri dam reservoir (Georgia) based on old catalogs and ongoing monitoring. In: Journal of Seismology 27 (2023), Nr. 6, S. 953-977 (doi.org/10.1007/s10950-023-10173-5).
[10] Weisgerber, J.; Rebmeister, M.: Deformationsmonitoring an der Enguri-Staumauer im Kaukasusgebirge, Georgien. In: DVW Baden-Württemberg e. V. (2022), Heft 1.
[11] Aberle, B.: Rehabilitation work on the Enguri dam pressure tunnel. In: WasserWirtschaft 113 (2023), Heft 6, S. 64-67.

DOI dieses Beitrags: http://doi.org/10.1007/s35147-024-2368-y

Thomas Niederhuber, Birgit Müller, Thomas Röckel, Mirian Kalabegishvili, Nino Tsereteli, Bernd Aberle, Matthieu Rebmeister, Andreas Schenk, Jakob Weisgerber, Malte Westerhaus, Andreas Rietbrock and Frank R. Schilling

**Monitoring concept for the Enguri Arch Dam, Georgia**

At the Enguri Arch Dam, research on methods for a comprehensive monitoring system has been ongoing since 2019. The aim is to identify correlations between different processes and mechanisms, to derive recommendations for the safe operation of the facility. Historical and operational data as well as the results of new measurements will serve as the basis for the analysis. In addition to established methods, new concepts such as the successful testing of GB-SAR for dam deformation monitoring have been implemented and Artificial intelligence (AI) methods will be used.

SPRINGERNATURE